

สายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

โดย

| | |
|-----------------|------------|
| นางสาวคณินิจ | ดาทองงอน |
| นายอรรถการ | สุขบันเทิง |
| นายเฉลิมเกียรติ | สกุลพอง |

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

| | | |
|-------------------------|---|----------|
| หัวข้อโครงการ | สายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน | |
| นักศึกษา | นางสาวคณินิจ คาทองงอน | B4503705 |
| | นายอรรถการ สุขบันเทิง | B4508908 |
| | นายเฉลิมเกียรติ สกุลพอง | B4508946 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต | |
| พ.ศ. | 2550 | |
| อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ | ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ | |

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบทดสอบและประเมินคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนสำหรับสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency) เพื่อให้ล้ากลืนแผ่กระจายออกเพียงด้านเดียว ในโครงการฉบับนี้ได้ทำการคำนวณเพื่อหาค่าความโค้งของสายอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยใช้โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กสนามไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC 2 โดยจำลองสายอากาศต้นแบบขึ้นมา เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงการสื่อสารภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในระบบสื่อสาร ณ ความถี่ปฏิบัติการ 476 MHz แล้วนำสายอากาศไดโพลโค้งที่ออกแบบมาวางเรียงกันแบบแถวลำดับ (Array) จากนั้นจะทำการวัดทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลคำนวณและผลการทดสอบว่าไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของสายอากาศไดโพลโค้งสำหรับสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด ให้คำปรึกษา แนะนำชี้แนะข้อบกพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้ามและให้กำลังใจ ตลอดจนฝึกฝนและสนับสนุนข้าพเจ้าให้มีความสามารถในการทำโครงการจนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้ ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่สั่งสอนให้ความรู้มาโดยตลอด และยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการใช้ชีวิตในรั้วมหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณมณีนรีรัตน์ ทุมพงษ์ เลขานุการการประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้ความสะดวกในการติดต่อกับอาจารย์

ขอขอบคุณคุณคุณประพล จาระตะคุ วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือ 3 ที่ช่วยเป็นธุระติดต่อการเบิกจ่ายค่าอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงการประสานงานการขอใช้เครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำอาคารเครื่องมือ 1 ที่คอยสอนการใช้เครื่องมือแต่ละประเภท

ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่คอยแนะนำวิธีการวัดทดสอบสายอากาศ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดาซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ผู้คอยห่วงใย ให้โอกาสให้กำลังใจและให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จมาจนถึงบัดนี้

นางสาวคณินิจ ดาทองงอน

นายอรรถการ สุขบันเทิง

นายเฉลิมเกียรติ สกุลพอง

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|---------------|
| บทคัดย่อ..... | ก |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ข |
| สารบัญ..... | ค |
| สารบัญ(ต่อ)..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | จ |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| สารบัญรูป(ต่อ) | ช |
| สารบัญรูป(ต่อ) | ซ |
| สารบัญรูป(ต่อ) | ฌ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 กล่าวนำ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ..... | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 3 |
| 1.5 สรุป..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน..... | 4 |
| 2.1 กล่าวนำ..... | 4 |
| 2.2 คุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์..... | 4 |
| 2.3 ทฤษฎีสายอากาศไดโพล..... | 12 |
| 2.4 การแมตช์ซิ่ง (Matching Network) | 18 |
| 2.5 เฟสซิ่งไลน์ (Phasing line)..... | 22 |
| 2.6 สรุป..... | 28 |
| บทที่ 3 การจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม..... | 29 |
| 3.1 กล่าวนำ..... | 29 |
| 3.2 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 [5]..... | 29 |

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----------|
| 3.3 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2..... | 30 |
| 3.4 การใช้งานโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2..... | 33 |
| 3.5 สรุป..... | 56 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวัดสายอากาศ..... | 57 |
| 4.1 กล่าวนำ..... | 57 |
| 4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ..... | 57 |
| 4.3การสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน..... | 67 |
| 4.4 สรุป..... | 77 |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... | 78 |
| 5.1 บทสรุป..... | 78 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 80 |
| บรรณานุกรม..... | 81 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 82 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 แสดงช่องและความถี่โทรทัศน์ทั้ง 2 ระบบ..... | 12 |
| ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของสายนำสัญญาณประเภทต่าง ๆ..... | 70 |
| ตารางที่ 4.2 สรุปผลวัดของสายอากาศไดโพลโค้ง..... | 77 |
| ตารางที่ 5.1 ตารางสรุป..... | 79 |

สารบัญรูป

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์ | |
| แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว..... | 6 |
| รูปที่ 2.3 สายอากาศไดโพล..... | 13 |
| รูปที่ 2.4 ระนาบสนามไฟฟ้า: E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก: H-plane (x-y) ของสายอากาศไดโพล..... | 14 |
| รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ..... | 15 |
| รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ..... | 15 |
| รูปที่ 2.7 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ | 16 |
| รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสนามไฟฟ้า (E-plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ)และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ) | 17 |
| รูปที่ 2.9 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล..... | 17 |
| รูปที่ 2.10 การแมตช์ด้วยสตัป..... | 18 |
| รูปที่ 2.11 การประยุกต์ใช้สตัปกับสายอากาศ..... | 19 |
| รูปที่ 2.12 สตัปแบบเปิดและปิดสำหรับสายโคแอกเซียล..... | 20 |
| รูปที่ 2.13 สตัปรวมกับบาลัน..... | 20 |
| รูปที่ 2.14 การแมตช์ของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่ แผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์..... | 21 |
| รูปที่ 2.15 การแมตช์ของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่ แผ่นตัวสะท้อน 2 อิลิเมนต์..... | 21 |
| รูปที่ 3.1 ไอคอน 4nec2x ในการเข้าใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2..... | 33 |
| รูปที่ 3.2 การเลือกไฟล์แบบจำลอง..... | 33 |
| รูปที่ 3.3 เมนูหลักของโปรแกรม..... | 34 |
| รูปที่ 3.4 ไอคอน Edit NEC input-file บนหน้าต่างหลัก..... | 35 |
| รูปที่ 3.5 การเลือกคำสั่ง New ในหน้าต่าง Geometry Edit เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง Geometry Edit (File changed)..... | 36 |

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.6 หน้าต่าง Geometry Edit (File changed) และส่วนประกอบต่างๆ..... | 36 |
| รูปที่ 3.7 การป้อนค่าความถี่สายอากาศที่ต้องการออกแบบ..... | 38 |
| รูปที่ 3.8 รูปการออกแบบสายอากาศไดโพลโค้ง..... | 39 |
| รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงขนาดรัศมีของสายอากาศที่ต้องการในการออกแบบ..... | 39 |
| รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงจำนวน Sections ภายในสายอากาศ..... | 40 |
| รูปที่ 3.11 การออกแบบสายอากาศพร้อมทั้งลักษณะการป้อนแหล่งจ่าย..... | 40 |
| รูปที่ 3.12 ตำแหน่งและค่าในการปรับเช็กเมนต์..... | 41 |
| รูปที่ 3.13 หน้าต่าง Generate..... | 41 |
| รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความต้านทาน ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm..... | 42 |
| รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ารีแอ็กแตนซ์ ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm..... | 43 |
| รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ากำลังที่รับได้ ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm..... | 43 |
| รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความกว้างแถบ (Beamwidth) ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm..... | 44 |
| รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความต้านทาน ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm..... | 44 |
| รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ารีแอ็กแตนซ์ ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm..... | 45 |
| รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ากำลังที่รับได้ ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm..... | 45 |
| รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความกว้างแถบ (Beamwidth) ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm..... | 46 |
| รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความต้านทาน ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm..... | 46 |
| รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ารีแอ็กแตนซ์ ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm..... | 47 |

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ากำลังที่รับได้ ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm..... | 47 |
| รูปที่ 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm..... | 48 |
| รูปที่ 3.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่าความต้านทาน กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm..... | 49 |
| รูปที่ 3.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm..... | 49 |
| รูปที่ 3.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่ากำลังที่รับได้ กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm..... | 50 |
| รูปที่ 3.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm..... | 50 |
| รูปที่ 3.30 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศไดโพลโค้ง..... | 51 |
| รูปที่ 3.31 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง..... | 52 |
| รูปที่ 3.32 การออกแบบสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อน..... | 52 |
| รูปที่ 3.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่า ความต้านทาน ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm..... | 53 |
| รูปที่ 3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่า รีแอกแตนซ์ ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm..... | 53 |
| รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่า กำลังที่รับได้ ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm..... | 54 |
| รูปที่ 3.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่าความกว้าง ลำคลื่น (Beamwidth) ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm..... | 54 |
| รูปที่ 3.37 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อน..... | 55 |
| รูปที่ 3.38 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลาย บนแผ่นตัวสะท้อน..... | 56 |
| รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน..... | 58 |
| รูปที่ 4.2 บาลันแบบโคแอกเซียล $\lambda/4$ (1:1) | 58 |

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.3 แมตซ์ซิ่งของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์..... | 59 |
| รูปที่ 4.4 สายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์..... | 59 |
| รูปที่ 4.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 476 MHz ของสายอากาศต้นแบบ..... | 60 |
| รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความถี่..... | 61 |
| รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีแอ็กแตนซ์กับความถี่..... | 61 |
| รูปที่ 4.8 รูปค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) ของสายอากาศ..... | 62 |
| รูปที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ..... | 62 |
| รูปที่ 4.10 สายอากาศไดโพลอ้างอิงที่ใช้เป็นตัวส่ง..... | 63 |
| รูปที่ 4.11 ห้อง chamber ใช้สำหรับวัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน..... | 64 |
| รูปที่ 4.12 วิธีวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศต้นแบบ..... | 64 |
| รูปที่ 4.13 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D..... | 65 |
| รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์..... | 66 |
| รูปที่ 4.15 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน..... | 67 |
| รูปที่ 4.16 สายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน..... | 68 |
| รูปที่ 4.17 ค่าความต้านทานในสาย phasing line..... | 69 |
| รูปที่ 4.18 สาย phasing lineของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลาย บนแผ่นตัวสะท้อน..... | 71 |
| รูปที่ 4.19 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ..... | 72 |
| รูปที่ 4.20 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศจากการวัด..... | 72 |
| รูปที่ 4.21 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ ไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน..... | 73 |
| รูปที่ 4.22 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ..... | 73 |
| รูปที่ 4.23 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลาย ที่แผ่นตัวสะท้อน..... | 75 |
| รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อิลิเมนต์..... | 76 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

การสื่อสารและระบบข้อมูลข่าวสารนับเป็นสิ่งที่สำคัญการสื่อสารที่รู้จักกันดีแบบหนึ่งคือการส่งสัญญาณโทรทัศน์ ในปัจจุบันนี้การใช้งานคลื่นความถี่สูงมาก (Very High Frequency: VHF) ซึ่งมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 30-300 MHz เป็นช่วงความถี่ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้งานแพร่สัญญาณภาพและเสียงของสถานีส่งโทรทัศน์ช่องต่างๆ ในประเทศไทย จนกระทั่งในบางพื้นที่การใช้ช่องสัญญาณในย่านความถี่ดังกล่าวถูกใช้จนหมดสิ้น ไม่เหลือช่องสัญญาณเพื่อแพร่สัญญาณภาพและเสียงสำหรับสถานีใหม่ๆ ได้อีก ดังนั้นจึงต้องขยายไปใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) ที่มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 300-3000 MHz แทน ส่งผลให้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแพร่สัญญาณความภาพและเสียงต้องเปลี่ยนแปลง และอุปกรณ์ที่สำคัญในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่สำคัญมากคือสายอากาศ ซึ่งต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้สอดคล้องและสามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

การส่งสัญญาณโทรทัศน์ในระบบ UHF มีสายอากาศหลายชนิดที่ใช้ในการส่งสัญญาณโดยนำสายอากาศมาจัดทำเป็นแถวลำดับ (Array) ซึ่งสายอากาศไดโพลเส้นตรง (Straight Dipole) เป็นสายอากาศอีกชนิดที่ใช้ส่งสัญญาณในระบบ UHF ซึ่งสายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่ายจึงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามที่ต้องการและสายอากาศไดโพลยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความกว้างของลำคลื่น (Beamwidth) ที่กว้างไม่เพียงพอ ซึ่งหมายถึงมีพื้นที่การส่งสัญญาณน้อย ดังนั้นจึงต้องการที่จะเพิ่มความกว้างของลำคลื่น (Beamwidth) ในการส่งสัญญาณของสายอากาศให้มากขึ้น โดยการปรับรูปร่างของสายอากาศให้เป็นแบบสายอากาศไดโพลโค้ง (Curved Dipole Antenna) ในระบบสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ต้องการสายอากาศที่ให้อัตราขยายกำลังงานสูง แบบรูปการแผ่พลังงานอาจเป็นสายอากาศเชกเตอร์หรือสายอากาศรอบทิศทาง และความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่กว้างเพียงพอ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กล่าวมานี้ทำให้สายอากาศที่ใช้อยู่หลายๆ แบบมีข้อจำกัดจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนสายอากาศให้เข้ากับความต้องการดังกล่าว นอกจากนั้นสายอากาศจะต้องมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรง ทนกำลังได้สูง ประกอบง่าย และที่สำคัญต้องมีต้นทุนต่ำ ดังนั้นด้วยลักษณะโครงสร้างสายอากาศไดโพลโค้งจึงตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน สำหรับสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing-Wave Ratio: VSWR) และอัตราขยาย (Gain)

1.2.2 ศึกษาสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน สำหรับสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF

1.2.3 ศึกษาการทำงานและการใช้งานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (Numerical Electromagnetics Code 2: NEC2) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศต้นแบบที่ใช้สำหรับสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF

1.2.4 เพื่อออกแบบสายอากาศต้นแบบให้มีความเหมาะสมกับย่านความถี่ UHF

1.3 ขอบเขตของโครงการ

การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศทำได้โดยเริ่มจาก

1.3.1 ศึกษาโครงสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน และผลการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.2 ศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลโค้งที่ความถี่ 476 MHz ได้แก่ แบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบและ อัตราขยาย

1.3.3 ศึกษาวิธีการแมตช์สายอากาศ (Matching Method) แบบต่างๆ ที่เหมาะสมกับสายอากาศแบบไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

1.3.4 สร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะตามค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบ วิเคราะห์ สรุป และยืนยันผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (4NEC 2)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1.4.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นของสายอากาศ

1.4.2 ศึกษาการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับโครงการของโปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (4NEC 2)

1.4.3 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (4NEC 2)

1.4.4 สร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2

1.4.55 สรุปผลการทำงาน

1.5 สรุป

โครงงานฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศไดโพล โดยใช้เทคนิคการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้ง และลวดวงจรที่ปลายของไดโพลโค้งเข้ากับแผ่นตัวสะท้อน โดยเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของลำคลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น โดยใช้วิธีการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (4NEC 2)

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

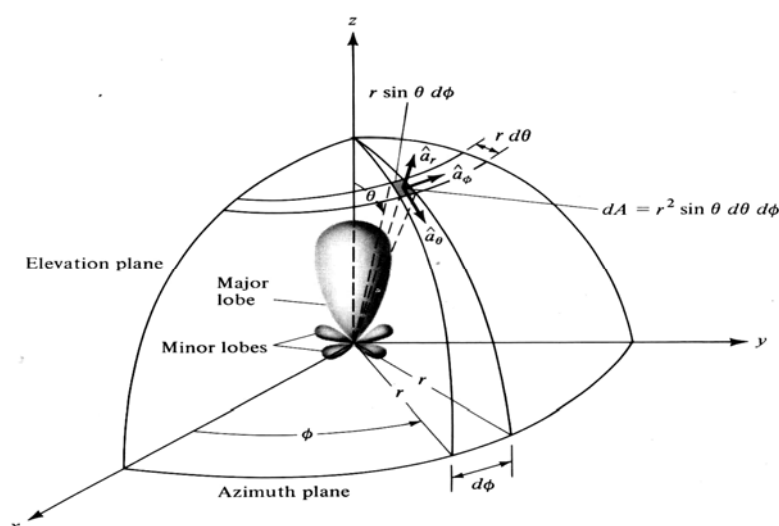
สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนคลื่นที่อยู่ในสายส่งสัญญาณ หรือท่อนำคลื่นให้แพร่กระจายออกสู่ตัวกลางที่สายอากาศวางอยู่ เช่น อากาศอิสระ (free space) หรือ ไดอิเล็กตริก และในทางกลับกันจะทำหน้าที่รับคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางให้เข้ามาอยู่ในท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณได้ การศึกษารูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญในบทนี้จึงจะกล่าวถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายอากาศที่จะเป็นสายอากาศส่งสัญญาณโทรทัศน์ในย่านความถี่ UHF ทฤษฎีของสายอากาศไดโพล เพื่อนำมาประยุกต์เป็นสายอากาศไดโพลโค้ง ลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

2.2 คุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์

สำหรับคุณสมบัติของสายอากาศที่จะทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวส่งที่ดีนั้น จะต้องเป็นสายอากาศที่ทำให้สายอากาศภาครับสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด นั่นคือ ไม่ว่าสายอากาศภาครับจะอยู่ทางทิศใดของสายอากาศภาครับส่ง และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบใด ก็ควรที่จะสามารถรับคลื่นจากสถานีส่งได้ โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ในย่าน UHF จะต้องมีการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา และมีโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักเบา รองรับกำลังงานที่สูงได้และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศได้มากขึ้น ซึ่งในโครงงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบทดสอบและประเมินคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลโค้ง ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสายอากาศไดโพลที่ถูกดัดโค้งวางอยู่บนแผ่นโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนของคลื่น เพื่อใช้เป็นสายอากาศสำหรับสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ภายใต้การใช้งานจริงในระบบการสื่อสาร ๓ ความถี่ปฏิบัติการ 476 MHz ดังนั้นคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่ง ที่สำคัญควรมีดังนี้

2.2.1 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation pattern)

แบบรูปการแผ่พลังงานหรือแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศเป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปของกราฟฟิกหรือในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดตำแหน่ง (Space Coordinates) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังงานจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (Directivity Coordinates) เสมอ ซึ่งคุณสมบัติการแผ่กำลังงานนี้สามารถที่จะพิจารณาถึงความหนาแน่นของเส้นแรงกำลังงาน (Power Flux Density) ความเข้มการแผ่กำลังงาน (Radiation Intensity) ความแรงของสนาม (Field Strength) เฟสของสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity Phase) หรือการแยกขั้วคลื่น (Polarization) ได้ ซึ่งคุณสมบัติของการแผ่กำลังงานสามารถที่จะแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและแบบสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ

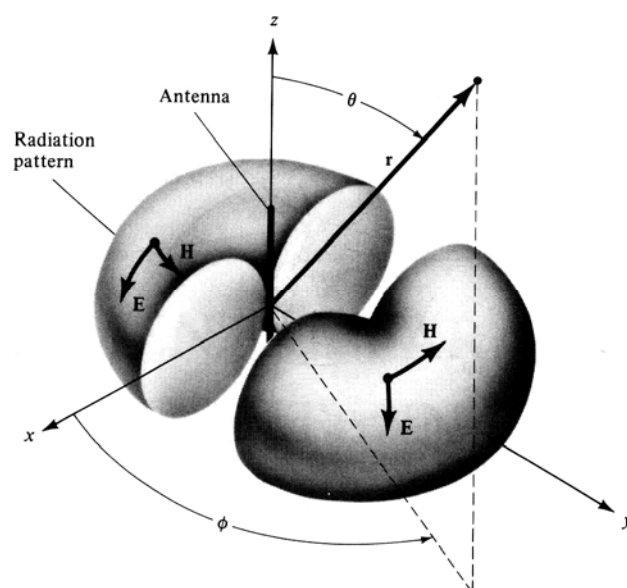
เส้นการกวาดของกำลังงานที่รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Field Pattern) และอีกวิธีหนึ่งถ้าเป็นแบบรูปที่ใช้แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่ง เราจะเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (amplitude Field Pattern)

แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศสามารถอธิบายได้ 3 แบบ ดังนี้

1. แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นมานว่า ไม่มีการสูญเสียภายในตัวเอง และมีการแผ่พลังงานออกมาเท่ากันทุกทิศทาง

2. แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional pattern) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ ซึ่งมักจะนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave Dipole)

3. แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) คือสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ในที่นี้คือ มุมกวาด (Azimuth) และระนาบที่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบมีทิศทางในกรณีนี้คือมุมเงย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว

ในโครงการฉบับนี้ได้ออกแบบสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรูปปลายที่แผ่นตัวสะท้อนให้มีแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) เพราะสายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ ในย่านความถี่ UHF จะต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา

2.2.2 การโพลาไรซ์ (Polarization)

การแยกแ้วคลื่นที่แผ่กำลังงานออกไป (Polarization of a Radiated Wave) หมายถึง การอธิบายคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งขนาดสัมพัทธ์และทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดทิศทางของการแผ่กำลังงานออกไป การแยกแ้วคลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบเชิงเส้น (Linear) แบบวงรี (Elliptical) และแบบวงกลม (Circular) ส่วนสายอากาศไดโพลนั้นมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น คือเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของคลื่นเมื่อแปรผันตามเวลา ณ จุดใดๆ ในอากาศอย่างต่อเนื่อง แล้วมีลักษณะเป็นเส้นตรง

สำหรับการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อนที่ออกแบบมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น เพราะในโครงงานฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานสนามระยะไกล ซึ่งเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจะมีการแปรผันตามเวลา ณ จุดใด ๆ ในอากาศอย่างต่อเนื่อง เมื่อเราทำการหมุนรอบรับคลื่น จาก 0 องศา ถึง 360 องศา เวลาที่วัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน

2.2.3 อัตราขยาย (Gain)

ก. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

ข. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ง่ายที่สุด ก็คือวิธีที่เรียกว่า วิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (Reference Antenna Method) หรือ วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) หรือวิธีการแทนที่ (Substitution Method) ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับด้วยสายอากาศอ้างอิง (P_{ref}) กับกำลังงานที่รับได้จากสายอากาศที่ทำการทดสอบ (P_{test}) ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ต้องการทราบจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref} \quad (2.1)$$

เมื่อต้องการคำตอบ ให้มีหน่วยเป็น dB ก็จะสามารถหาได้จากสมการ

$$G_{test}(dB) = P_{test}(dB) - P_{ref}(dB) + G_{ref}(dB) \quad (2.2)$$

ก่อนที่จะนำวิธีการแทนที่มานั้น เราจะต้องเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงเสียก่อน โดยการใส่สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันทุกประการมาเป็นสายอากาศรับและส่ง จากนั้นวัดกำลังงานที่ส่งออกไปและค่าของกำลังงานที่รับได้ นำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย

ซึ่งจะเป็นอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังสมการ

$$G = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{rec}}{P_0}} \quad (2.3)$$

เมื่อ G คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิง

r คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสอง

P_{rec} และ P_0 คือ กำลังงานที่รับได้และกำลังงานที่ส่งออกไป ตามลำดับ

λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ (หน่วยเดียวกันกับระยะทาง)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง ทำการวัดทดสอบโดยใช้สายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศอ้างอิง ค่าที่ได้จึงมีหน่วยเป็นเดซิเบลไดโพล (dBd)

2.2.4 ความกว้างแถบ (Bandwidth)

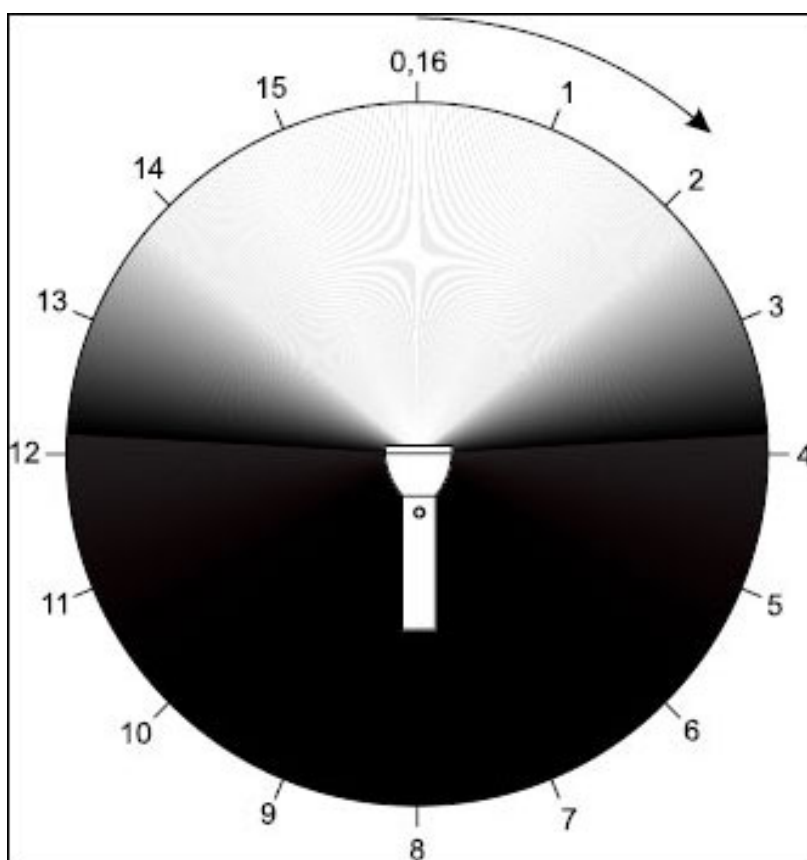
ความกว้างแถบของสายอากาศ ถูกนิยามว่า ย่านความถี่ที่ยังอยู่ภายในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ สภาวะดังกล่าวพิจารณาจากคุณสมบัติบางตัวของสายอากาศ และให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงของความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง (Center Frequency) ซึ่งสภาวะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้ จะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นี้

กรณีที่เป็น สายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antennas) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศสามารถทำงานได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบเท่ากับ 10 : 1 แสดงว่าความถี่สูงสุดมีค่ามากกว่าความถี่ต่ำสุดอยู่ 10 เท่า

และถ้าหากเป็นกรณีของ สายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antennas) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ (ความถี่สูงสุดลบความถี่ต่ำสุด) เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความถี่แถบ ตัวอย่างเช่น ถ้าสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบเท่ากับ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้มีค่าเป็น 5% ของความถี่กลางของความถี่แถบ

2.2.5 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth)

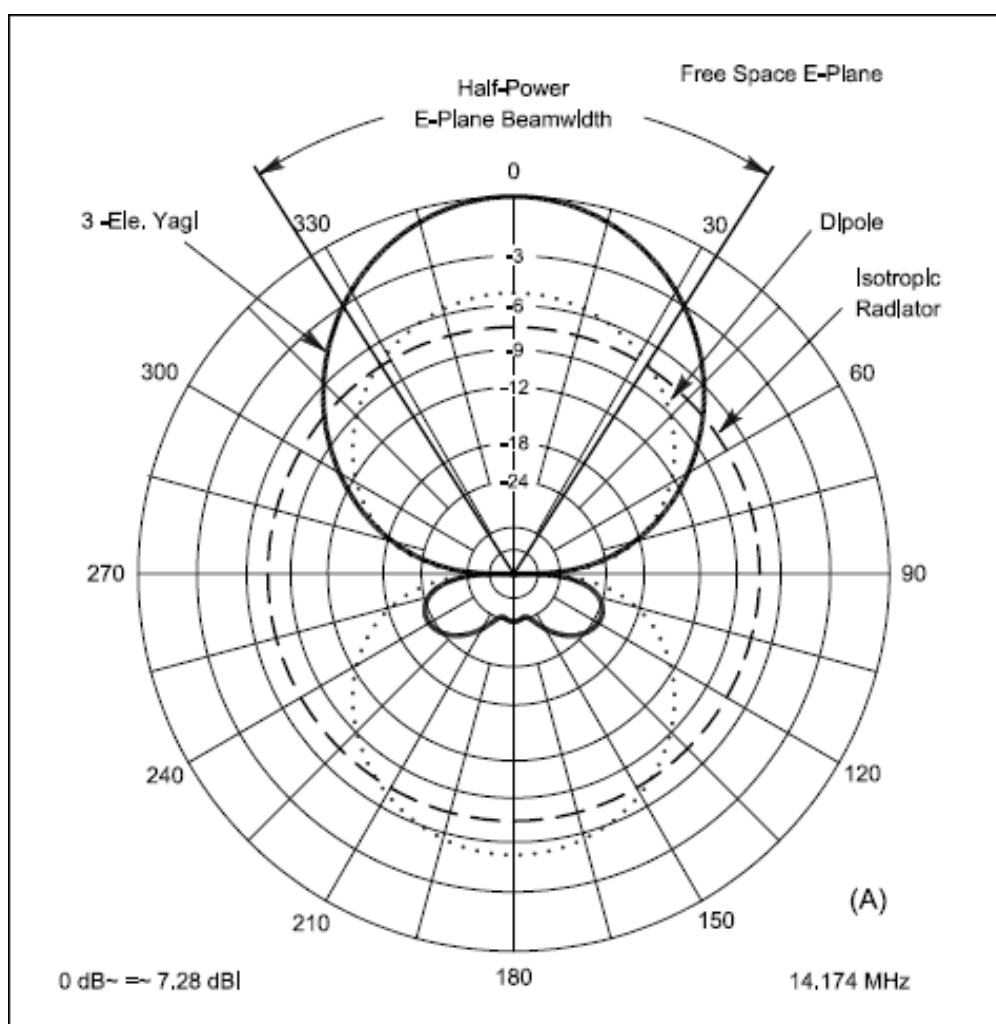
ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) คือ ความกว้างของลำคลื่นเป็นคุณสมบัติของสายอากาศทิศทางที่วัดเป็นองศาของส่วนที่เป็น Major lobe หรือ Main lobe ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งกำลังไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) ของค่าสูงสุด



รูปที่ 2.2.5 แสดงการเปรียบเทียบรูปแสงของไฟฉาย

2.2.6 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง(Half-Power Beamwidth) อธิบายได้ว่าในระนาบหนึ่ง ๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งความเข้มของการแผ่กำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน และคำว่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมักจะใช้อธิบายถึงความกว้างของลำคลื่นที่มีค่า 3 dB (3-dB Beamwidth) เสมอ



รูปที่ 2.2.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง(Half-Power Beamwidth)

ตัวอย่าง ความกว้างลำคลื่น(Beamwidth) ของสายอากาศ Yagi 3-element ซึ่ง ทิศทาง 0 องศา เรียกว่า main lobe จะมีลำคลื่นที่แรงที่สุด ถ้าเราวัดความแรงไปทางด้านข้างจนความแรงลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) เรียกว่า จุด Half-power เราวัดมุมจากจุด Half-power จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งจะเท่ากับ Beamwidth ตัวอย่างในรูปที่ 2.2.5 คือประมาณ 66 องศา

นอกจากนี้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศยังถูกนำมาใช้ในการอธิบายถึงความสามารถในการแยกแยะ (Resolution Capacity) ของสายอากาศเพื่อแยกแยะระหว่างแหล่งกำเนิดสองตัวซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างลำคลื่นซึ่งมีค่าเป็นศูนย์จุดแรก (First Null Beamwidth: FNBW/2) ซึ่งมักจะนำไปใช้ในการประมาณค่าของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) นั่นคือแหล่งกำเนิดสองจุดที่แยกออกจากกันด้วยระยะเชิงมุมเท่ากับหรือมากกว่า FNBW/2 HPBW

เนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศ เช่น อิมพีแดนซ์อินพุท แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยาย และการแยกขั้วคลื่น ที่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความกว้างแถบของสายอากาศ จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงหรือมีผลตอบสนองต่อความถี่เหมือนกัน จึงไม่มีการกำหนดคุณลักษณะโดยเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งสำหรับการหาแถบความกว้างของสายอากาศ ดังนั้นวิธีการกำหนดแถบความกว้าง จึงมักจะแบ่งตามกลุ่มของคุณลักษณะต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่

- แถบความกว้างแบบรูป (Pattern Bandwidth) เป็นแถบความกว้างที่พิจารณาจากอัตราขยาย (Gain) ระดับของโวลต์ด้านข้าง ความกว้างลำคลื่น การแยกขั้ว (Polarization) และทิศทางของลำคลื่น

- แถบความกว้างจากค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Bandwidth) เป็นแถบความกว้างที่พิจารณาจาก ค่าอิมพีแดนซ์อินพุท และค่าประสิทธิภาพของการกระจายพลังงาน

สำหรับความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่ใช้ในการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ในย่าน UHF จะต้องมีความกว้างแถบ (Bandwidth) มากกว่า 6 MHz เนื่องจาก ตามมาตรฐานของ FCC กำหนดให้ความถี่โทรทัศน์ทั้งภาพและเสียงมีความกว้างช่องละ 6 MHz ในขณะที่มาตรฐาน CCIR กำหนดให้กว้างถึง 7 MHz โดยแบ่งย่านความถี่ในช่วง VHF เป็น 2 แบนด์ คือแบนด์ด้านต่ำ (Lowband) กับแบนด์ด้านสูง (Highband) เนื่องจากความถี่ในย่าน VHF อยู่ในช่วง 30-300 MHz แต่ในย่านความถี่นี้มีการส่งกระจายเสียงของสถานีวิทยุ FM ดังนั้นความถี่แบนด์ต่ำในระบบ FCC จึงบรรจุช่องโทรทัศน์ช่อง 2-6 เอาไว้ ในขณะที่ระบบ CCIR บรรจุช่อง 2-4 เอาไว้ ความถี่แบนด์กลางเป็นของ FM และทางด้านสูงของ FCC บรรจุช่อง 7-13 ในขณะที่ของ CCIR บรรจุช่อง 5-12 เอาไว้

ความถี่ย่าน UHF สำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ในประเทศไทยในอนาคต

เนื่องจากสถานีโทรทัศน์ในประเทศไทยปัจจุบัน ส่งความถี่ในย่าน VHF ย่านความถี่ VHF จะส่งสัญญาณออกอากาศได้ตั้งแต่ช่อง 2 ถึงช่อง 12 สถานีหลักสี่ที่กรุงเทพฯ ออกอากาศช่อง 3-5-7-9-11 เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างสถานีต่อสถานีในย่านความถี่ VHF จะเพิ่มช่องอีกไม่ได้ ดังนั้นในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยจะต้องทำการเพิ่มช่องในย่านความถี่ UHF ซึ่งจะเพิ่มช่องจำนวน 49 ช่อง กรมไปรษณีย์โทรเลขขอสงวนความถี่ไว้บางช่อง สำหรับกิจกรรม CELLULAR ในย่านความถี่ UHF จะแบ่งย่านความถี่เป็น 2 Band

- Band IV เริ่มต้นช่องที่ 21 ถึงช่องที่ 37 (ความถี่ 470-606 MHz)
- Band V เริ่มต้นที่ช่องที่ 38 ถึงช่องที่ 69 (ความถี่ 606-862 MHz)

ตาราง 2.1 แสดงช่องและความถี่โทรทัศน์ทั้ง 2 ระบบ

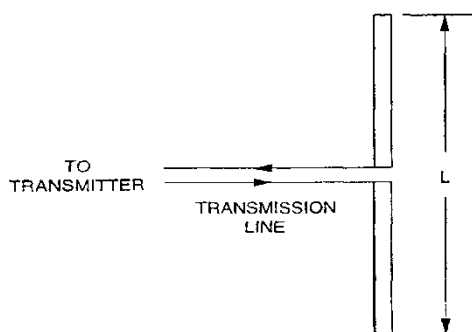
| ช่อง โทรทัศน์ | ระบบ FCC 525 เส้น | | | ระบบ CCIR 625 เส้น | | |
|------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| | ขอบเขต ของความถี่ | คลื่นพาห์ ของภาพ | คลื่นพาห์ ของเสียง | ขอบเขต ของความถี่ | คลื่นพาห์ ของภาพ | คลื่นพาห์ ของเสียง |
| 2 | 54-60 | 55.25 | 59.75 | 47-54 | 48.25 | 53.75 |
| 3 | 60-66 | 61.25 | 65.75 | 54-61 | 55.25 | 60.75 |
| 4 | 66-72 | 67.25 | 71.75 | 61-68 | 62.25 | 67.75 |
| 5 | 76-82 | 77.25 | 81.75 | 174-181 | 175.25 | 180.75 |
| 6 | 82-88 | 83.25 | 87.75 | 181-188 | 182.25 | 187.75 |
| 7 | 174-180 | 175.25 | 179.75 | 188-195 | 189.25 | 194.75 |
| 8 | 180-186 | 181.25 | 185.75 | 195-202 | 196.25 | 201.75 |
| 9 | 186-192 | 187.25 | 191.75 | 202-209 | 203.25 | 208.75 |
| 10 | 192-198 | 193.25 | 197.75 | 209-216 | 210.25 | 215.75 |
| 11 | 198-204 | 199.25 | 203.75 | 216-223 | 217.25 | 222.75 |
| 12 | 204-210 | 205.25 | 209.75 | 223-230 | 224.25 | 229.75 |
| 13 | 210-216 | 211.25 | 215.75 | | | |

2.3 ทฤษฎีสายอากาศไดโพล

2.3.1 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด มีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.3 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพล และไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การแจกแจงของกระแส (Current Distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.3 สายอากาศไดโพล

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบเล็กๆของความยาวไดโพล (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงของกระแสที่เท่ากันตลอดความยาวคุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพล อุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กๆ

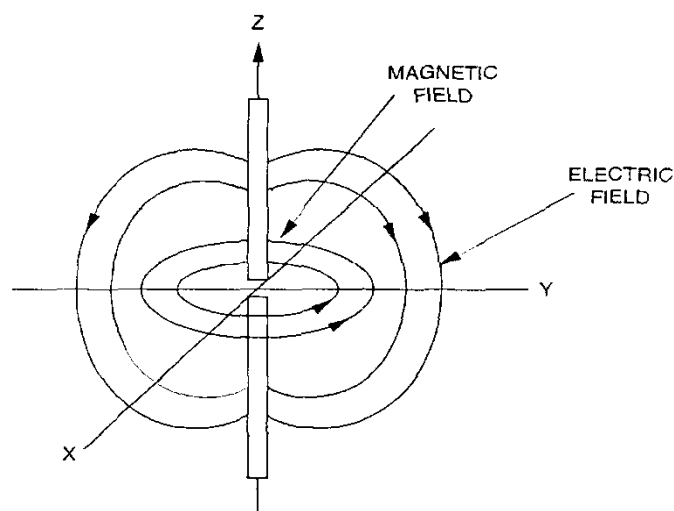
2.3.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานคือ การแสดงรูปแบบของกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่วัดได้ในบริเวณสนามระยะไกล (Far Field Region) คุณสมบัติการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (Space Coordinates) บริเวณของสนามระยะไกลคือ บริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับการระยะทางที่อยู่ห่างจากสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศใดๆ สามารถที่จะทราบได้ด้วยการวัดทดลองและถ้าเราทราบลักษณะการแจกแจงของกระแสบนตัวสายอากาศ ก็จะสามารถคำนวณหาจากการคำนวณได้เช่นเดียวกัน การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

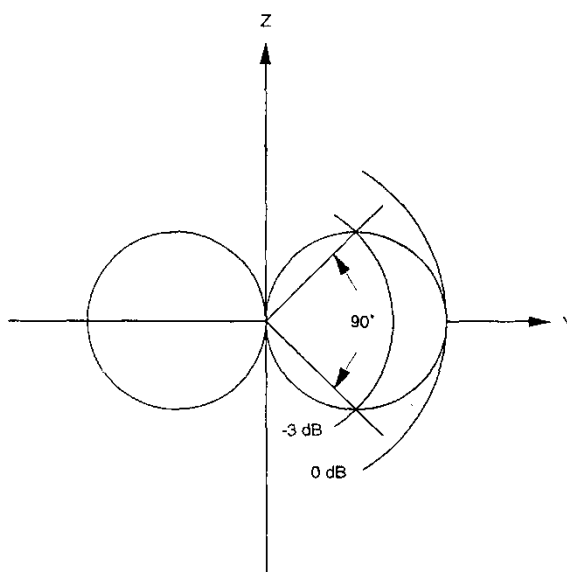
| | | |
|-------|-----------|------------------------------|
| เมื่อ | R | คือ ระยะของสนามระยะไกล |
| | D | คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ |
| | λ | คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ |

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตาม ฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพัทธ์ของกำลังงาน ที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบ รูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณี ที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่ กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะวัดในแต่ละระนาบที่ตั้ง ฉากกัน คือระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็กโดยเรียกว่า E-plane และ H-plane ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็น ฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรที่จะจัด สภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการ สะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

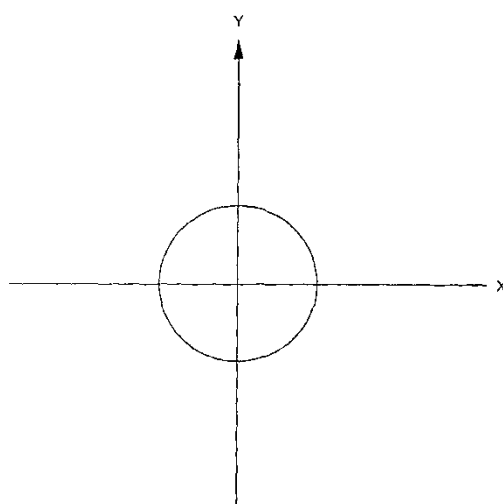


รูปที่ 2.4 ระนาบสนามไฟฟ้า: E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก: H-plane (x-y) ของสายอากาศไดโพล

รูปที่ 2.5 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของ ไดโพลอุดมคติ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานนี้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วย เพราะว่าการแผ่กระจายกำลังงานจะมีความแรงของสัญญาณสูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทาง อื่นๆ ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ซึ่ง ในแบบรูปนี้การแผ่กระจายกำลังงานจะเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ



รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ของสายอากาศ คือ การพิจารณามุมในลำคลื่นหลักโดยคิดที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3 dB) ของกำลังงานที่แผ่ออกในทิศทางของกำลังงานสูงสุด

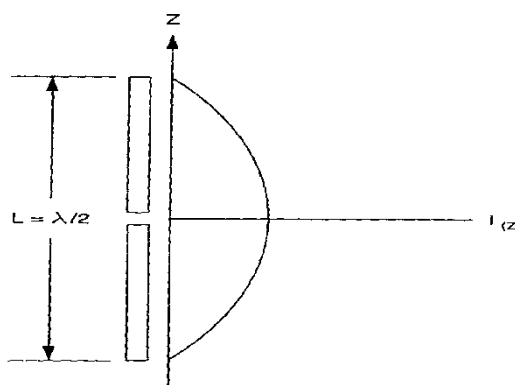
$$\text{HPBW} = \left| \theta_{\text{HPBWleft}} - \theta_{\text{HPBWright}} \right| \quad (2.5)$$

ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติในระนาบสนามไฟฟ้า E-plane จะเท่ากับ 90 องศาซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.5 สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติซึ่งใช้กันทั่วไป จะมีความยาว L เท่ากับ $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ การแจกแจงของกระแสที่เกิดขึ้นบนไดโพล $\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยกระแสนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางและมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุดรูปที่ 2.8 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และในไดโพล อุดมคติ โดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW อยู่ที่ 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 2.6

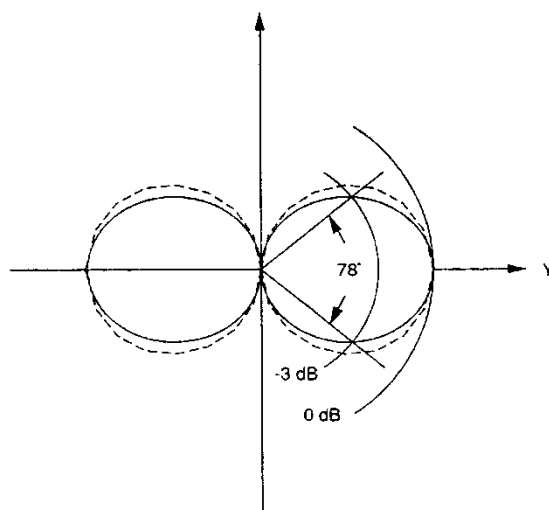
ในการออกแบบสายอากาศซึ่งสมมุติฐานของโครงการฉบับนี้ สายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อนที่ออกแบบ จะให้ ค่าความกว้างแถบ (Beamwidth) ที่กว้างกว่าทฤษฎีข้างต้นคือต้องมากกว่า 80 องศา

2.3.3 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna Polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะใช้ในการอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุดและวัดได้ในสนามระยะไกล การสายอากาศจำนวนมากจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และยังถูกแบ่งออกเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical Polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal Polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical)

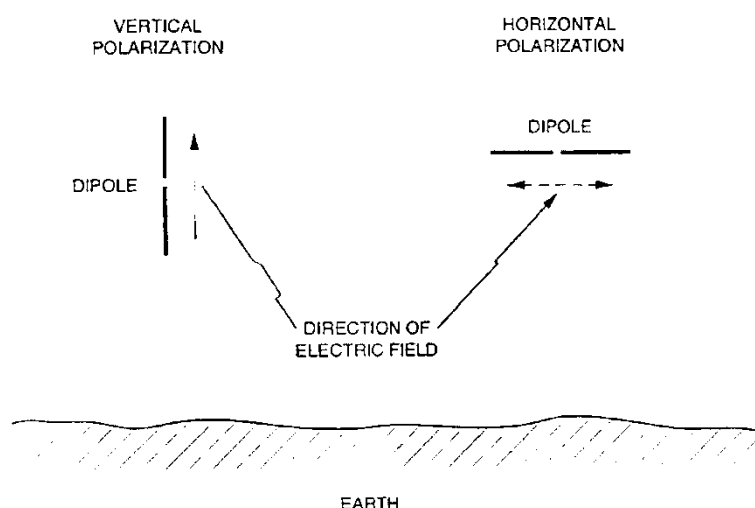


รูปที่ 2.7 การแจกแจงของกระแสนบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)

บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะพิจารณาจากรูปทรงของตัวสายอากาศเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะมีส่วนประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน เช่น สายอากาศไดโพลและยากิเราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นขนานไปกับส่วนประกอบของตัวสายอากาศ แต่ก็มีสายอากาศบางชนิดซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกันแต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของโครงสร้างมาทำนายการโพลาไรซ์ได้ เช่น สายอากาศปากแตร (Horn) แบบบ่วง (Loop) และแบบร่อง (Slit) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสัญญาณที่ส่งมา

หากเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นของการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งแต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เรียกว่า เกิดการแยกการโพลาไรซ์แบบไขว้ (Cross-Polarization Isolation)

2.4 การแมตช์ซิ่ง (Matching Network)

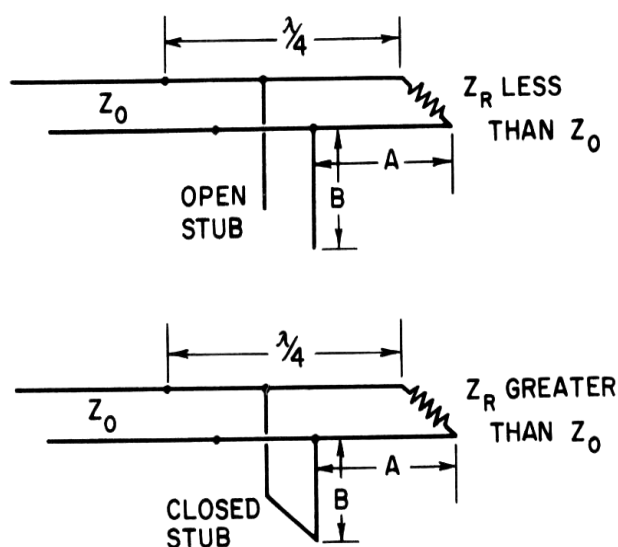
ในการติดตั้งสายอากาศใช้งานจริง ต้องทำการแมตช์ซิ่ง เพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ต้องการ สำหรับโครงการนี้ทำการแมตช์สายอากาศ กับสายโคแอกเชียล 50 โอห์ม ในที่นี้นำเสนอวิธีการแมตช์ อย่างง่าย 2 วิธี ได้แก่

2.4.1 การแมตช์ด้วยสตับ (Stub Match)

การทำสตับเป็นวิธีการแมตช์อีกวิธีที่นิยมใช้กัน การทำสตับมีหลักการและทฤษฎีพื้นฐานมาจากทฤษฎีสายส่ง (Transmission Line) เพื่อกำจัดส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ทั้งที่เป็นคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (Capacitive Reactance) และอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (Inductive Reactance) แบ่งออกเป็นสองชนิด คือ

ก. สตับแบบเปิด (Open Stub)

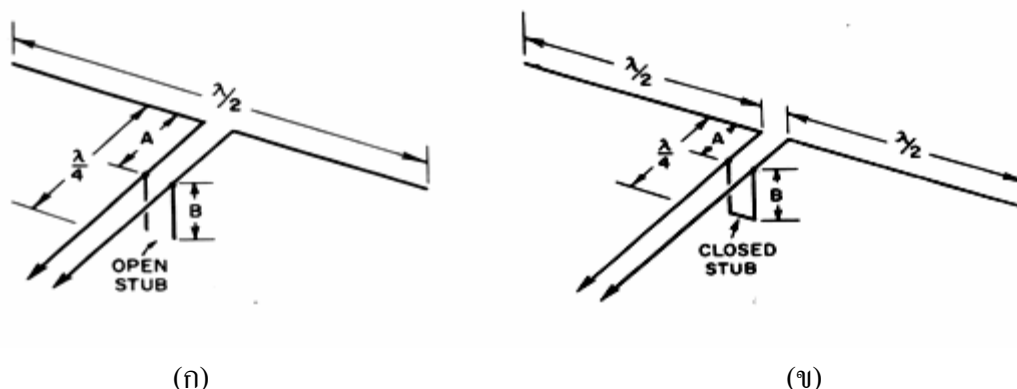
ข. สตับแบบปิด (Short or Closed Stub)



รูปที่ 2.10 การแมตช์ด้วยสตับ

ระยะจากโหลดไปที่สตับ (ระยะ A ตามรูปที่ 2.10) และระยะของสตับ (ระยะ B) ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและสตับ และสัดส่วนระหว่าง Z_0 กับ Z_R โดยที่สัดส่วนระหว่าง Z_0 กับ Z_R ก็คือ สัดส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ดังนั้น ระยะของสตับจึงเป็นฟังก์ชันของ SWR ถ้าสายนำสัญญาณและสตับมีอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันและเท่ากับ Z_0 ระยะ A และ B จะขึ้นอยู่กับ SWR

เท่านั้น ในทำนองเดียวกัน ถ้า SWR ที่ถูกวัดก่อนการทำสตั๊ป สตั๊ปสามารถบอกตำแหน่ง และความยาวของมันจะถูกหาได้ แม้ว่าจะไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริงของมัน



รูปที่ 2.11 การประยุกต์ใช้สตั๊ปกับสายอากาศ

การนำสตั๊ปไปประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งใช้กับสายลักษณะปลายเปิด จากรูปแสดงให้เห็นว่า Z_R น้อยกว่า Z_0 เป็นสตั๊ปแบบเปิดในรูปที่ 2.11 (ก) และ Z_R มากกว่า Z_0 เป็นสตั๊ปแบบปิดในรูปที่ 2.13 (ข)

อาจจะต้องใช้แผนภาพสมิท (Smith chart) ในการหาความยาวของสตั๊ป (B) และระยะห่างจากโหลด (A) ถ้าโหลดมีอิมพีแดนซ์ที่เป็นความต้านทานอย่างเดียว และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายกับสตั๊ปเหมือนกัน สามารถหาความยาวได้จากสมการ

1. สตั๊ปแบบปิด (Z_R มากกว่า Z_0)

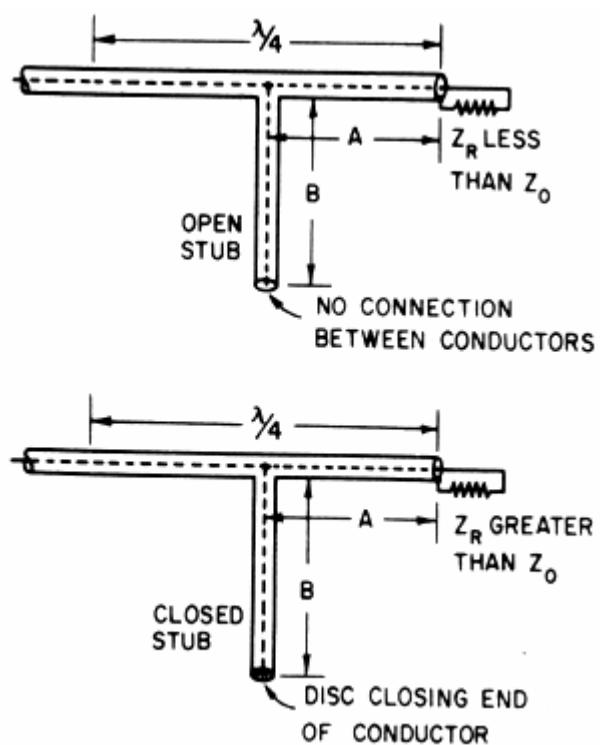
$$A = \tan^{-1} \sqrt{SWR} \text{ และ } B = \tan^{-1} \frac{\sqrt{SWR}}{SWR - 1} \quad (2.6)$$

2. สตั๊ปแบบเปิด (Z_R น้อยกว่า Z_0)

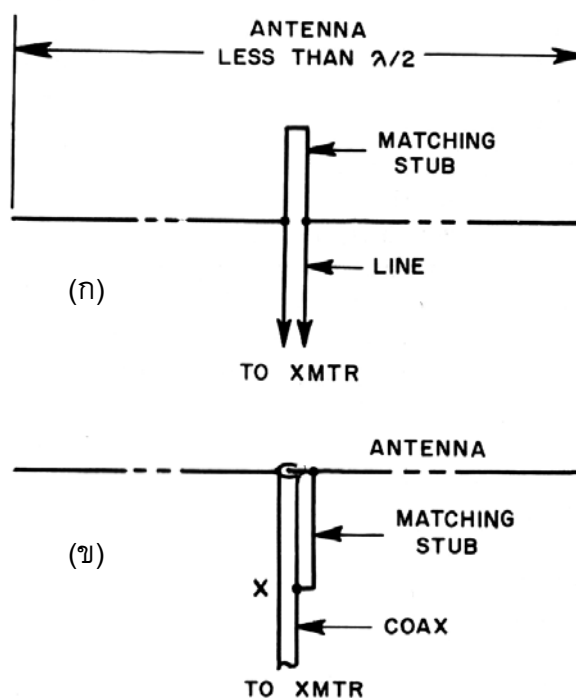
$$A = \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{SWR}} \text{ และ } B = \tan^{-1} \frac{SWR - 1}{\sqrt{SWR}} \quad (2.7)$$

2.4.2 การทำสตั๊ปด้วยสายโคแอกเซียล

สำหรับหลักการทำสตั๊ปของสายโคแอกเซียล มีลักษณะเช่นเดียวกับการทำสตั๊ปของสายปลายเปิด โดยเมื่อเป็นสายโคแอกเซียล จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถใช้สมการข้างต้นในการคำนวณหาความยาว A และ B ได้ สำหรับการติดตั้งสายอากาศกับสตั๊ป ในที่นี้ใช้ข้อต่อรูปตัว T (T - connector) ในการทำสตั๊ปด้วยสายโคแอกเซียลอาจทำการแมตช์แบบสตั๊ปร่วมกับการแมตช์แบบบาลัน (Balun) ดังรูปที่ 2.13



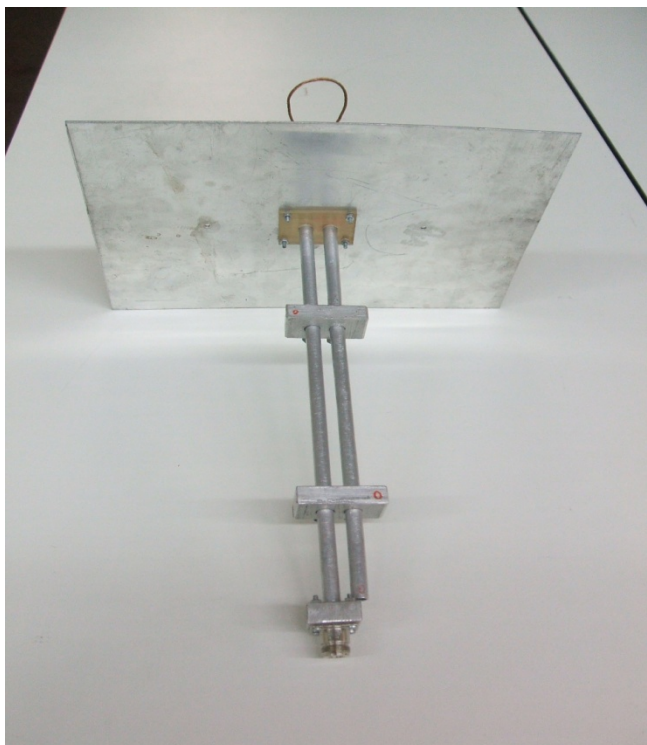
รูปที่ 2.12 สตับแบบเปิดและปิดสำหรับสายโคแอกเซียล



รูปที่ 2.13 สตับรวมกับบาลัน

(ก) รูปแบบพื้นฐาน

(ข) รูปแบบที่ใช้กับสายโคแอกเซียล



รูปที่ 2.14 การแมตซ์จิ่งของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่
แผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์



รูปที่ 2.15 การแมตซ์จิ่งของสายอากาศแกลวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่
แผ่นตัวสะท้อน 2 อิลิเมนต์

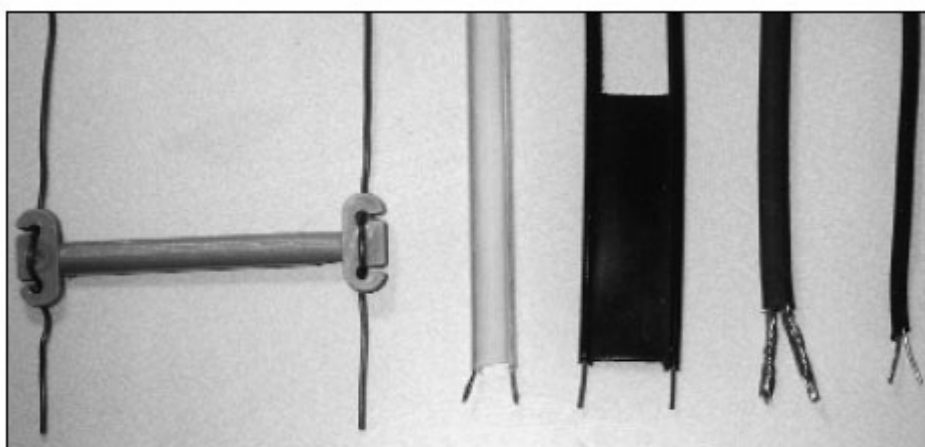
2.5 เฟสซิงไลน์ (Phasing line)

ในการวัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนจะต้องทำการสร้างสายนำสัญญาณมาต่อเพื่อขนานสายอากาศทั้งสองอีลิเมนต์เข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกสายนำสัญญาณลักษณะนี้ว่า เฟสซิงไลน์ (phasing line) ซึ่งการต่อใช้งานสายในลักษณะนี้ก็เพื่อจัดเฟสในระบบสายอากาศรวมหลายๆ ตัว หรือ เรียกว่า ควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ (quarter wave transformer)

2.5.1 สายนำสัญญาณ Transmission Lines

ในการรับส่งสัญญาณวิทยุ นั้นสายนำสัญญาณก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าสายอากาศเลย การจะเลือกใช้สายนำสัญญาณ การจะเลือกใช้สายนำสัญญาณให้เหมาะสมกับงานนั้น ต้องศึกษาเรื่องของสายนำสัญญาณ ให้ดีก่อน สายนำสัญญาณ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. Balance Line คือสายนำสัญญาณที่มีตัวนำ 2 เส้น ที่มีลักษณะเหมือนกันนำมาต่อขนานกัน โดยมีตัวกลางกั้นไว้ อาจจะเป็นอากาศก็ได้ เช่นสายอากาศ Openwire จะมีฉนวนยึดสายเอาไว้เป็นระยะ เพื่อความแข็งแรง และคงลักษณะการขนานกันเอาไว้



รูปที่ 2.51 สายนำสัญญาณ Openwire

Open wire line constructed using 1mm diameter copper wire and spacers. 300 Ω twin line with polyethylene insulation, 450 Ω 'window' twin line, 75 Ω heavy duty twin line, 75 Ω light weight twin line

สูตรการคำนวณ ค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Balance Line

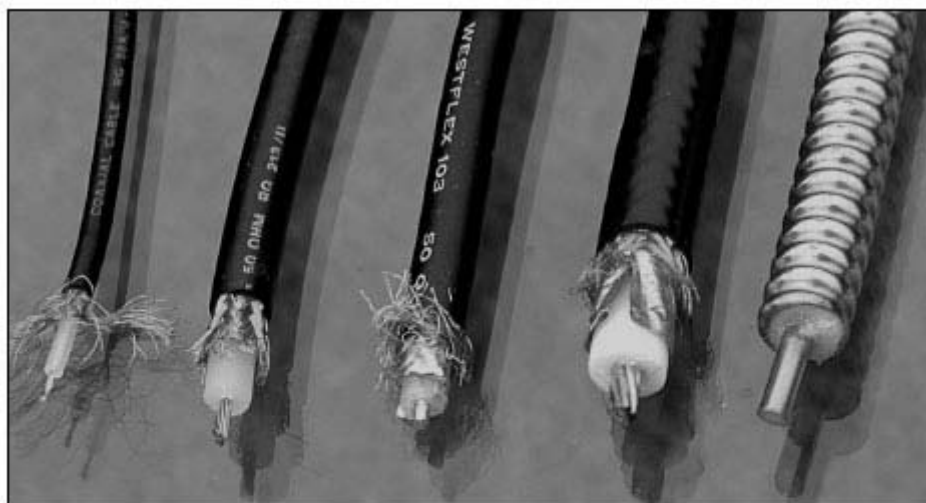
$$Z_0 = 276 \log_{10} \frac{2S}{d}$$

Z_0 = ค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Balance Line

S = ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง (วัดจากแกนกลางของตัวนำ)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (ใช้หน่วยเดียวกับ S)

2. Unbalance Line คือสายนำสัญญาณที่มีตัวนำ 2 เส้นมีลักษณะต่างกัน หรือที่เรารู้จักกันดีในนาม Coaxial Cable สายนำสัญญาณแบบนี้ถูกสร้างขึ้นมาทดแทนสายสัญญาณแบบ Balance Line เพื่อลดการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายนำสัญญาณและป้องกันสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าสามารถติดตั้งใกล้ ๆ โลหะได้



รูปที่ 2.52 สายนำสัญญาณ coaxial cable

Five examples of coaxial cable. From left to right, RG58A/U, 50-ohm RG213/U, Westflex 103 and Andrew LDF4-50 with outer sheath removed

สูตรการคำนวณค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Unbalance Line

$$Z_0 = 138 \log_{10} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Z_0 = ค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Unbalance Line

b = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของชีลด์

a = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลาง (ใช้หน่วยเดียวกับ b)

ในการติดตั้งสายแบบ balance Line เราต้องป้องกันไม่ให้ความชื้นเกิดขึ้นบนสายเพราะความชื้นทำให้ ค่าไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่า impedance ของสายเปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้ การติดตั้งสายนำสัญญาณต้องห่างจากตัวนำหรือว่าโลหะอื่น ๆ โดยระยะห่างจากตัวนำอื่นประมาณ 2-3 เท่าของระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง สำหรับสาย Coaxial นั้นจะมีชีลด์ต่อลงกราวด์ ฉะนั้นการติดตั้งจึงไม่ค่อยมีปัญหา ติดตั้งใกล้โลหะได้ ปัญหาเรื่องความชื้นน้อยกว่า เว้นแต่ความชื้นจะเข้าไปในสาย สรุปได้ว่าสายแบบ balance จะมีการสูญเสียน้อย แต่สาย Coaxial จะติดตั้งง่ายกว่าค่าความเร็วของคลื่นวิทยุในสายนำสัญญาณ (Velocity Factor) ในสายนำสัญญาณนั้น คลื่นวิทยุ เดินทางได้ช้ากว่าในบรรยากาศ และช้ากว่าความเร็วของแสง ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นในสายนำสัญญาณนี้สัมพันธ์กับค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาทำเป็น Dielectric (Dielectric constant) โดยทั่วไปแล้ว ค่าความเร็วของคลื่นในสายเราเรียกว่า ตัวคูณความเร็วของสายเช่น สาย เบอร์ RG-58 A/U มีตัวคูณความเร็วเท่ากับ 0.66 ดังนั้นความเร็วของคลื่นในสาย คือ 0.66×300 ล้านเมตร / วินาที เท่ากับ 1.98 ล้านเมตร / วินาที

สูตรการคำนวณค่าความเร็วในสาย

$$\lambda = \frac{983.6}{f} \times VF$$

โดยที่

λ = wavelength, in ft

f = frequency in MHz

VF = velocity factor

สูตรการคำนวณค่าความเร็วในสาย (velocity factor) มีหน่วยเป็น ฟุต เมื่อสายนำสัญญาณนำมาใช้ปกติ ตัวคูณความเร็วของสายแทบไม่ต้องสนใจ แต่ถ้านำสายสัญญาณมาต่อเพื่อ ขนานกับ

สายอากาศหลาย ๆ ต้น เข้าเป็นชุด เช่น การอากาศยาก็หลาย ๆ สแต็ค หรือสายอากาศ Dipole หลาย ๆ ห่วง (สาย phasing line) เราต้องนำความเร็วตัวนี้มาเกี่ยวข้องด้วย

สูตรคำนวณเฟสซิงไลน์ (Phasing Line)



ประโยชน์สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาความยาวของสายนำสัญญาณเพื่อจะขนานสายอากาศหลายๆ ต้นเข้าเป็นชุดเช่น สายอากาศยาก็แบบหลาย ๆ สแต็คหรือสายอากาศไดโพลหลายๆ ห่วง สายนำสัญญาณที่จะนำมาใช้หรือที่เรียกชื่อเฉพาะในการใช้งานแบบนี้ว่า เฟสซิงไลน์ (phasing line)

สูตรมีดังนี้

$$\text{จากจำนวนเลขคี่ } 1, 3, 5, 7, 9 \dots \times \frac{1}{4} \times \frac{29980}{f} \times Vr$$

f = ความถี่ใช้งาน หน่วยเป็น MHz

Vr = ค่าตัวคูณความเร็ว หาได้จากตารางคุณสมบัติของสายนำสัญญาณเบอร์ต่างๆ

หมายเหตุ : ค่าที่คำนวณได้มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

ตัวอย่างเช่น สายนำสัญญาณเบอร์ RG-11 จากตารางมีค่าตัวคูณความเร็ว 0.66 และความถี่ใช้งาน 145.000 MHz

$$5 \times \frac{1}{4} \times \frac{29980}{145} \times 0.66 = 170.5 \text{ cm}$$

ตารางที่ 2.51 แสดงคุณลักษณะเบอร์สายนำสัญญาณ

| <i>RG or Type</i> | <i>Part Number</i> | <i>Nom. Z_0 Ω</i> | <i>VF %</i> | <i>Cap. pF/ft</i> | <i>Cent. Cond. AWG</i> |
|-------------------|--------------------|--|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| RG-6 | Belden 1694A | 75 | 82 | 16.2 | #18 Solid BC |
| RG-6 | Belden 8215 | 75 | 66 | 20.5 | #21 Solid CCS |
| RG-8 | Belden 7810A | 50 | 86 | 23.0 | #10 Solid BC |
| RG-8 | TMS LMR400 | 50 | 85 | 23.9 | #10 Solid CCA |
| RG-8 | Belden 9913 | 50 | 84 | 24.6 | #10 Solid BC |
| RG-8 | CXP1318FX | 50 | 84 | 24.0 | #10 Flex BC |
| RG-8 | Belden 9913F7 | 50 | 83 | 24.6 | #11 Flex BC |
| RG-8 | Belden 9914 | 50 | 82 | 24.8 | #10 Solid BC |
| RG-8 | TMS LMR400UF | 50 | 85 | 23.9 | #10 Flex BC |
| RG-8 | DRF-BF | 50 | 84 | 24.5 | #9.5 Flex BC |
| RG-8 | WM CQ106 | 50 | 84 | 24.5 | #9.5 Flex BC |
| RG-8 | CXP008 | 50 | 78 | 26.0 | #13 Flex BC |
| RG-8 | Belden 8237 | 52 | 66 | 29.5 | #13 Flex BC |
| RG-8X | Belden 7808A | 50 | 86 | 23.5 | #15 Solid BC |
| RG-8X | TMS LMR240 | 50 | 84 | 24.2 | #15 Solid BC |
| RG-8X | WM CQ118 | 50 | 82 | 25.0 | #16 Flex BC |
| RG-8X | TMS LMR240UF | 50 | 84 | 24.2 | #15 Flex BC |
| RG-8X | Belden 9258 | 50 | 82 | 24.8 | #16 Flex BC |
| RG-8X | CXP08XB | 50 | 80 | 25.3 | #16 Flex BC |
| RG-9 | Belden 8242 | 51 | 66 | 30.0 | #13 Flex SPC |
| RG-11 | Belden 8213 | 75 | 84 | 16.1 | #14 Solid BC |
| RG-11 | Belden 8238 | 75 | 66 | 20.5 | #18 Flex TC |
| RG-58 | Belden 7807A | 50 | 85 | 23.7 | #18 Solid BC |
| RG-58 | TMS LMR200 | 50 | 83 | 24.5 | #17 Solid BC |
| RG-58 | WM CQ124 | 52 | 66 | 28.5 | #20 Solid BC |

ควรใช้สายนำสัญญาณยาวเท่าไร ในการใช้สายนำสัญญาณส่งผ่านกำลังส่งจากเครื่องส่งวิทยุไปยังสายอากาศ และนำสัญญาณที่รับได้กลับเข้าสู่เครื่องรับ ในเครื่องรับวิทยุสื่อสาร สายนำสัญญาณจะยาวเท่าไร ก็ไม่มีผลต่อค่า impedance เราจะตัดที่ความยาวเท่าไรก็ได้ สายอากาศที่ matching ไม่ดีค่า SWR สูง มิได้หมายความว่า สายนำสัญญาณที่ต่อเข้าเครื่อง ไม่ลงตัวกับความยาวคลื่น ผิดกับสาย phasing line ที่ต้องคำนึงถึง ความยาวของสายเป็นพิเศษ ในการใช้งานธรรมดา ความยาวของสายมีผลคือ สูญเสียกำลังส่งไปในสาย (Losses in Transmission Lines) สายที่ยาวมากจะลดทอนกำลังส่งมาก ตัวอย่างเช่น สายอากาศสูง 30 เมตร ใช้สายนำสัญญาณ RG 58/U ถ้าส่งด้วยความถี่ 150 MHz จะสูญเสีย 6dB ถ้าเราส่งด้วยกำลังส่ง 10 วัตต์ กำลังจะถูกลดทอนไปถึง 7.49 วัตต์ กำลังส่งที่ออกไปถึง สายอากาศเพียง 2.51 วัตต์เท่านั้น แต่ถ้าเราเปลี่ยนมาใช้ สายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 แบบ โฟม จะมีการสูญเสียเพียง 2.1dB ที่ 30 เมตร กำลังส่งที่ปลายสายจะได้ถึง 6.17 วัตต์

ตารางที่ 2.52 แสดงเบอร์สายและอัตราการสูญเสีย (dB) ต่อ 100 ฟุต

| RG or Type | Part Number | Nom. Z_0 Ω | VF % | 1 MHz | Matched Loss (dB/100') | | |
|------------|---------------|------------------------|---------|-------|------------------------|-----|------|
| | | | | | 10 | 100 | 1000 |
| RG-6 | Belden 1694A | 75 | 82 | 0.2 | .7 | 1.8 | 5.9 |
| RG-6 | Belden 8215 | 75 | 66 | 0.4 | 0.8 | 2.7 | 9.8 |
| RG-8 | Belden 7810A | 50 | 86 | 0.1 | 0.4 | 1.2 | 4.0 |
| RG-8 | TMS LMR400 | 50 | 85 | 0.1 | 0.4 | 1.3 | 4.1 |
| RG-8 | Belden 9913 | 50 | 84 | 0.1 | 0.4 | 1.3 | 4.5 |
| RG-8 | CXP1318FX | 50 | 84 | 0.1 | 0.4 | 1.3 | 4.5 |
| RG-8 | Belden 9913F7 | 50 | 83 | 0.2 | 0.6 | 1.5 | 4.8 |
| RG-8 | Belden 9914 | 50 | 82 | 0.2 | 0.5 | 1.5 | 4.8 |
| RG-8 | TMS LMR400UF | 50 | 85 | 0.1 | 0.4 | 1.4 | 4.9 |
| RG-8 | DRF-BF | 50 | 84 | 0.1 | 0.5 | 1.6 | 5.2 |
| RG-8 | WM CQ106 | 50 | 84 | 0.2 | 0.6 | 1.8 | 5.3 |
| RG-8 | CXP008 | 50 | 78 | 0.1 | 0.5 | 1.8 | 7.1 |
| RG-8 | Belden 8237 | 52 | 66 | 0.2 | 0.6 | 1.9 | 7.4 |
| RG-8X | Belden 7808A | 50 | 86 | 0.2 | 0.7 | 2.3 | 7.4 |
| RG-8X | TMS LMR240 | 50 | 84 | 0.2 | 0.8 | 2.5 | 8.0 |
| RG-8X | WM CQ118 | 50 | 82 | 0.3 | 0.9 | 2.8 | 8.4 |
| RG-8X | TMS LMR240UF | 50 | 84 | 0.2 | 0.8 | 2.8 | 9.6 |
| RG-8X | Belden 9258 | 50 | 82 | 0.3 | 0.9 | 3.1 | 11.2 |
| RG-8X | CXP08XB | 50 | 80 | 0.3 | 0.9 | 3.1 | 14.0 |
| RG-9 | Belden 8242 | 51 | 66 | 0.2 | 0.6 | 2.1 | 8.2 |
| RG-11 | Belden 8213 | 75 | 84 | 0.2 | 0.4 | 1.3 | 5.2 |
| RG-11 | Belden 8238 | 75 | 66 | 0.2 | 0.7 | 2.0 | 7.1 |
| RG-58 | Belden 7807A | 50 | 85 | 0.3 | 1.0 | 3.0 | 9.7 |
| RG-58 | TMS LMR200 | 50 | 83 | 0.3 | 1.0 | 3.2 | 10.5 |
| RG-58 | WM CQ124 | 52 | 66 | 0.4 | 1.3 | 4.3 | 14.3 |
| RG-58 | Belden 8240 | 52 | 66 | 0.3 | 1.1 | 3.8 | 14.5 |
| RG-58A | Belden 8219 | 53 | 73 | 0.4 | 1.3 | 4.5 | 18.1 |
| RG-58C | Belden 8262 | 50 | 66 | 0.4 | 1.4 | 4.9 | 21.5 |
| RG-58A | Belden 8259 | 50 | 66 | 0.4 | 1.5 | 5.4 | 22.8 |

ลักษณะของสายนำสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวอย่างเช่น RG- 58A/U RG ย่อมาจาก Radio Guide ก็คือสายนำสัญญาณวิทยุ 58 เป็นเบอร์ของสาย
อักษรตัวแรก อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ แสดงถึงการเพิ่มเติมหรือการเปลี่ยนแปลง วัสดุ เช่น เปลือกสาย
จำนวนลดตัวนำ /U หมายถึง Utility หรือ Universal คือใช้ในงานทั่วไป

2.6 สรุป

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนคลื่นที่อยู่ในสายส่งสัญญาณหรือท่อนำคลื่นให้แพร่กระจายออกสู่ตัวกลางที่สายอากาศวางอยู่ เช่น อากาศอิสระ (free space) หรือไดอิเล็กตริกและในทางกลับกันจะทำหน้าที่รับคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางให้เข้ามาอยู่ในท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณได้ สายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ในระบบ UHF ที่ดีควรมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบทิศทาง ความกว้างแถบที่เพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศได้มากขึ้น สำหรับสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อนที่ทำการออกแบบในโครงงานฉบับนี้ การแผ่กำลังงานของสายอากาศเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) เพราะสายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ในย่านความถี่ UHF จะต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา การศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะและค่าการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ เมื่อได้ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลโค้งแล้ว จะต้องนำไปจำลองโครงสร้าง เพื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (4NEC2) ต่อไป

บทที่ 3

การจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศไดโพลโค้ง โดยการปรับรูปร่างสายอากาศไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งและลวดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับแผ่นตัวสะท้อน โดยเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของลำคลื่นในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น โดยเริ่มต้นด้วยการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 เพื่อดูแนวทางการเป็นไปได้ของสายอากาศ

3.2 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 [5]

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดมาใช้ได้โดยง่ายจาก <http://www.qsl.net/wb6tpu/swindex.html> การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User-Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้า ของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือการสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็กๆ (Wire) หรือพื้นผิว (Surface) จำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation: EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด หรือ สนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation: MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied Voltage Source) หรือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) 4NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) อัตราขยาย และสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้กำลังงาน (Power Budget) และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในโครงการฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำปิดทึบได้ดีกว่าการใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก

3.3 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส 4NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซกเมนต์ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะโปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น

เซกเมนต์เส้นลวดจะถูกกำหนดโดยระบบพิกัด (Co-Ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซกเมนต์ และขนาดของรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment Length: Δ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น λ โดยปกติ Δ ควรจะมีค่าน้อยกว่า 0.1λ ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่มีความยาวมากกว่านี้บนเส้นลวดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น 0.05λ หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า $10^{-3}\lambda$ ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายของกระแสจะทำให้ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius: a) ซึ่งสัมพันธ์กับ λ จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบ ด้วยกันที่ใช้ใน 4NEC2 คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็กๆ ของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน 4NEC2 จะบังคับกับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด ที่จุดเชื่อมต่อและที่ปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซกเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน 4NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่นๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่าง

ของจุดปลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} เท่าของความยาวเชกเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเชกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อจำกัดของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (Wire-Grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เชกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสมากหว่างสองเชกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถสรุปได้ เชกเมนต์ที่ซ้อนทับกัน อาจจะมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเชกเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า Δ/a มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับ ตลอดหลายเชกเมนต์

(3) จำเป็นที่จะต้องมีการมีเชกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย หรือ แหล่งกำเนิดแรงดัน สำหรับช่องว่างการกระตุ้น ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใดๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส 4NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณ จะเป็นอินพุตที่จะใส่เข้าไป คล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์ เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ประเภทด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรยายรายละเอียดของการทำงาน ซึ่งจะพิมพ์เป็นตัวแทนสื่อที่จุดเริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุแบบทางเรขาคณิตซึ่งจะระบุรูปทรงของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ การโหลด (Loading) การกระตุ้น (Excitation) รวมทั้งความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

รหัสข้อมูลทุกๆ รหัส จะมีตัวอักษร 2 ตัว ในคอลัมน์ที่หนึ่งและที่สอง เพื่อเป็นการระบุรหัสให้กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสระบุข้อมูลเส้นลวด (Wire Specification: GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไปดังนี้

| | | | | | | | | | |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| GW | I1 | I2 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 |
| ITG | NS | XW1 | YW1 | ZW1 | XW2 | YW2 | ZW2 | RAD | |

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไป คือ

ITG (I1) คือ ป้ายแสดงหมายเลข (Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าเท่าใด รวมทั้งเชกเมนต์ทุกเชกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขตามหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

YW1 (F2) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F3) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2 (F4) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

YW2 (F5) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

ZW2 (F6) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

RAD (F7) คือ รัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

จากรหัสตัวอย่างข้างต้น เมื่อทำการใส่ตัวแปรต่างๆ ลงไปแล้ว และสั่งให้โปรแกรมทำงาน 4NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้น ซึ่งเส้นลวดนี้จะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็กๆ จำนวน NS เซกเมนต์ การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะเดียวกันไปเรื่อยๆ ก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้นอกจากนี้ โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย 4NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (Conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้ เช่น ในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้อะลูมิเนียม ดังนั้นในการคำนวณโดยใช้ 4NEC2 ก็จะทำให้การกำหนดสภาพนำของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของอะลูมิเนียม คือ 5.08×10^7 S/m โดยการใช้คำสั่งโหลด (Load)

ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่นั้น สามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม Necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน 4NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นลวด ตามที่กำหนดในระบบพิกัด x, y และ z นอกจากนี้โปรแกรม Necview ยังใช้ในการดูผลแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ในระบบพิกัด x, y และ z ของสายอากาศที่ 4NEC2 คำนวณออกมาได้ด้วย สำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม 4NEC2 นั้น จะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ใส่เข้าไป เริ่มต้นด้วยการอธิบาย ตามมาด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการจะคำนวณ

4NEC2 ได้รับการยอมรับว่า เป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย 4NEC2 นั้น ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม 4NEC2 เอง จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้

3.4 การใช้งานโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

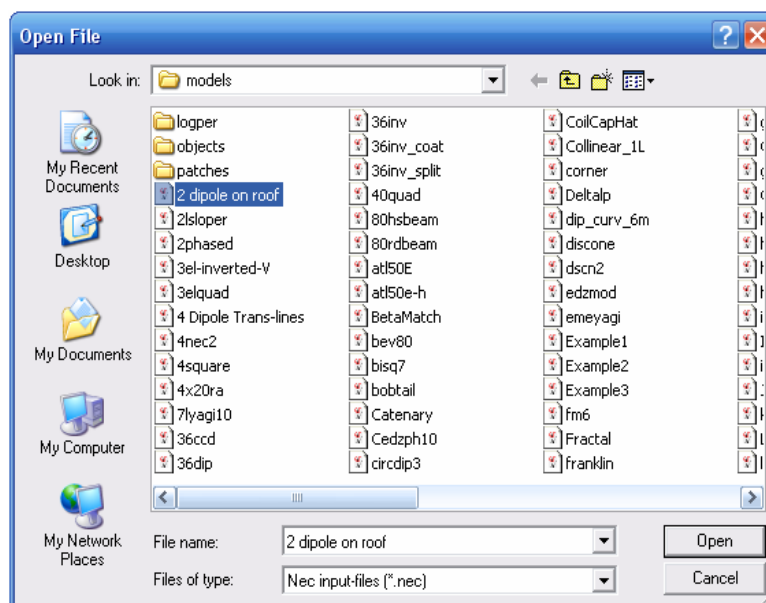
3.4.1 การเข้าใช้งานโปรแกรม

1) ดับเบิลคลิกที่ไอคอนโปรแกรม 4nec2x จะเห็นหน้าจอโปรแกรม ดังรูปที่ 3.1

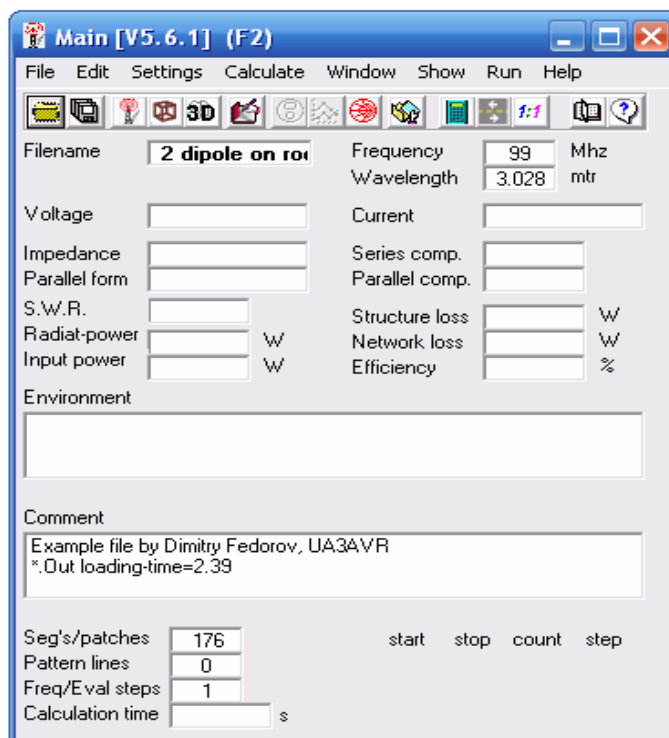


รูปที่ 3.1 ไอคอน 4nec2x ในการเข้าใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

2) เลือกไฟล์ของแบบจำลองใดๆ เพื่อเข้าสู่หน้าจอหลักของโปรแกรม เช่น 2 dipole on roof ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นหน้าต่างเมนูหลักของโปรแกรมจะปรากฏขึ้นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การเลือกไฟล์แบบจำลอง



รูปที่ 3.3 เมนูหลักของโปรแกรม

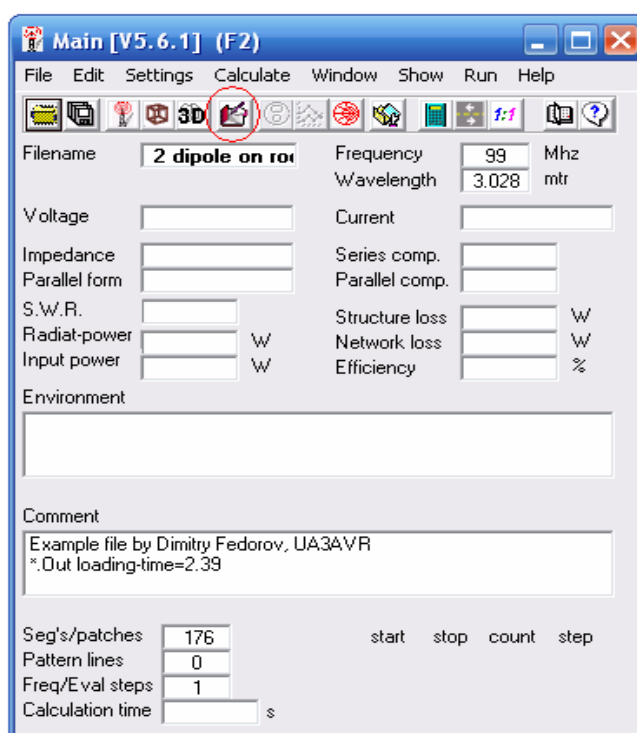
ในเมนูหลักของโปรแกรมแต่ละส่วนมีความหมายดังนี้

- Filename:** แสดงชื่อไฟล์ที่ใช้งานอยู่
- Frequency:** แสดงค่าความถี่ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศในหน่วย เมกะเฮิรตซ์ (MHz)
- Wavelength:** ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณจากค่าความถี่ใช้งาน ในหน่วยเมตร (m)
- Voltage:** ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับโปรแกรม
- Current:** ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่โปรแกรมคำนวณได้
- Impedance:** ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ณ ความถี่ใช้งาน
- Series comp.:** เป็นค่าที่ได้จากการแมตช์ของสายอากาศแบบอนุกรมที่ความถี่ใช้งาน
- Parallel form:** ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ณ ความถี่ใช้งานแบบขนาน
- Parallel comp.:** เป็นค่าที่ได้จากการแมตช์ของสายอากาศแบบขนานที่ความถี่ใช้งาน
- Radiat-power:** ค่ากำลังงานที่ใช้ในการแผ่กระจายกำลังงาน ในหน่วยวัตต์ (W)
- Input power:** ค่ากำลังงานด้านเข้า ในหน่วยวัตต์
- Structure loss:** ค่าความสูญเสียเนื่องจากโครงสร้าง ในหน่วยวัตต์
- Network loss:** ค่าความสูญเสียเนื่องจากโครงข่าย ในหน่วยวัตต์

| | |
|-------------------------|--|
| Efficiency | ค่าประสิทธิภาพ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ |
| Environment | ใช้แสดงเมื่อมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการทำงานของโปรแกรม |
| Comment: | แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างโครงสร้าง |
| Seg's/patches: | แสดงจำนวนเซกเมนต์ทั้งหมดในโครงสร้าง |
| Pattern line: | แสดงจำนวนบรรทัดในการสร้างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน |
| Freq/Eval steps: | จำนวนความถี่ที่ต้องการค้นพบ |
| Calculation tim: | เวลาที่โปรแกรมใช้ในการทำงานของไฟล์นั้น |
| Theta: | การกำหนดมุมในการหมุนเริ่มต้นและสิ้นสุดของมุม Theta โดยเพิ่มค่าทีละเท่าๆ กันจนครบ 360° |
| Phi: | การกำหนดมุมในการหมุนเริ่มต้นและสิ้นสุดของมุม Phi โดยเพิ่มค่าทีละเท่าๆ กันจนครบ 360° |

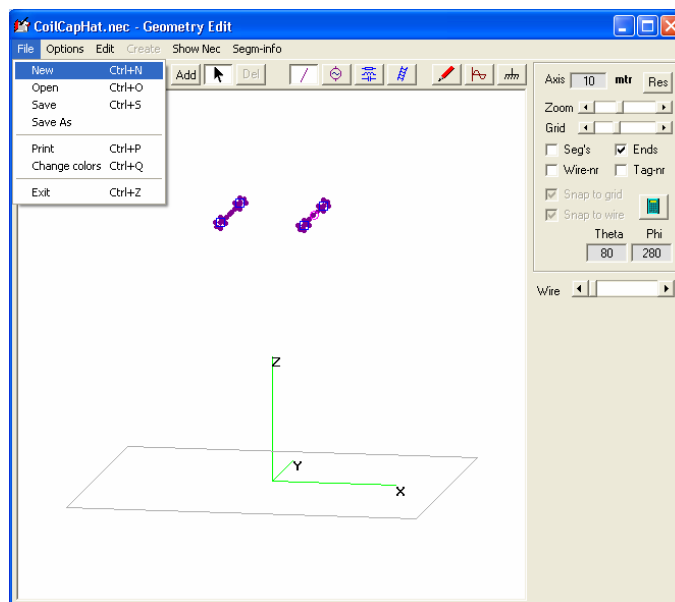
3.4.2 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ

- 1) คลิกที่ไอคอน Edit NEC input-file ดังรูปที่ 3.4

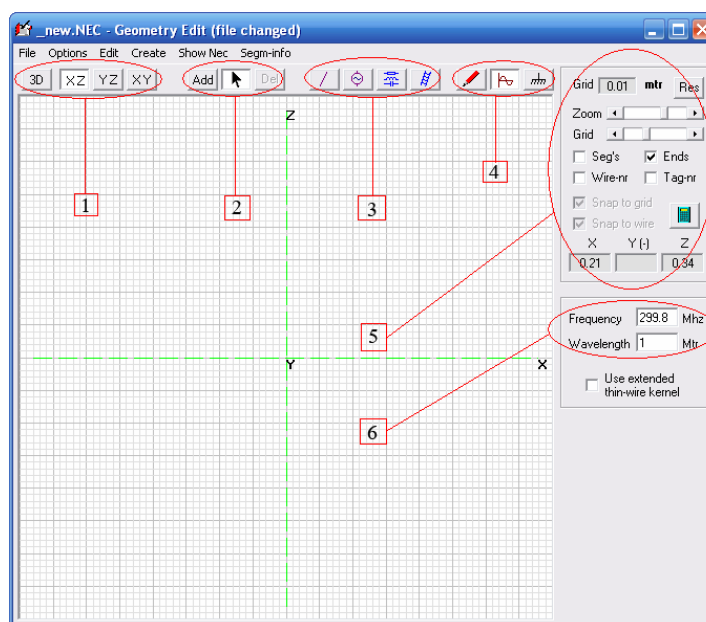


รูปที่ 3.4 ไอคอน Edit NEC input-file บนหน้าต่างหลัก

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Geometry Edit ขึ้น ให้ทำการเลือก File --> New ดังรูปที่ 3.5 เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนทำการออกแบบสายอากาศตัวใหม่ในหน้าต่าง Geometry Edit (File changed) ที่ปรากฏขึ้นตามมาดังรูปที่ 3.6







รูปที่ 3.5 การเลือกคำสั่ง New ในหน้าต่าง Geometry Edit เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง Geometry Edit (File changed)







รูปที่ 3.6 หน้าต่าง Geometry Edit (File changed) และส่วนประกอบต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 ความหมายของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้





ส่วนที่ 1 คือไอคอนเกี่ยวกับมุมมองของสายอากาศในแต่ละระนาบ ประกอบด้วย

-  คือมุมมองสายอากาศในลักษณะที่เป็น 3 มิติ
-  คือมุมมองสายอากาศในระนาบ XZ
-  คือมุมมองสายอากาศในระนาบ YZ
-  คือมุมมองสายอากาศในระนาบ XY




ส่วนที่ 2 คือไอคอนเกี่ยวกับการกระทำกับสายอากาศ ประกอบด้วย


-  คือคำสั่งเพิ่ม เช่นถ้าต้องการเพิ่มจุดป้อนแรงดัน ให้เลือกจุดป้อนแรงดัน (ดูส่วนที่ 3) จากนั้นเลือกไอคอน  แล้ววางลงบนส่วนของสายอากาศบนระนาบตามต้องการ
-  คือคำสั่งเลือก
-  คือคำสั่งลบ

ส่วนที่ 3 คือไอคอนประเภทขององค์ประกอบของตัวโครงสร้างสายอากาศ

-  คือโครงสร้างสายอากาศที่เป็นเส้นตรง
-  คือจุดป้อนสัญญาณ
-  คือประเภทของโหลด ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ
-  คือสายส่งสัญญาณ

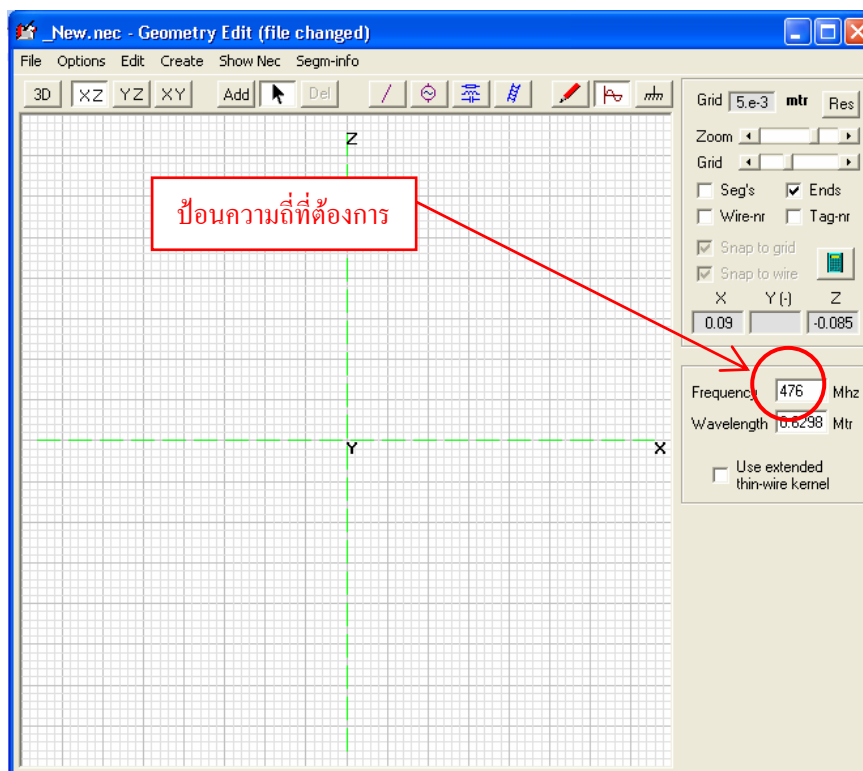
ส่วนที่ 4 คือไอคอนเกี่ยวกับตำแหน่ง ความถี่ และประเภทของกราฟตามลำดับ

-  คือไอคอนที่ใช้ในการแสดงจำนวนเส้นตรงของโครงสร้างสายอากาศที่มีอยู่ จำนวน เซกเมนต์และตำแหน่งของสายอากาศทั้งในแนวแกน X แกน Y และแกน Z
-  คือความถี่และความยาวคลื่นที่ใช้ในการออกแบบ
-  คือประเภทของกราฟที่ต้องการใช้ในการออกแบบ เช่น แบบอากาศว่าง และแบบสมบูรณ์แบบ

ส่วนที่ 5 คือส่วนที่ใช้ในการจัดการกับหน้าต่างในการออกแบบ เช่น แสดงกริด (Grid) ซุมเข้า-ออก ขยาย-ลด กริด และแสดงตำแหน่งของเมาส์ปัจจุบันในแนวแกน X แกน Y และแกน Z นอกจากนี้ในส่วนนี้ยังประกอบไปด้วยไอคอน  ซึ่งใช้ในการรันโปรแกรม เมื่อทำการออกแบบสายอากาศเสร็จสิ้นแล้ว

ส่วนที่ 6 คือความถี่และความยาวคลื่นที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งเป็นสิ่งแรกสุดในการป้อนค่าพารามิเตอร์ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวสายอากาศ

2) ป้อนค่าความถี่ของสายอากาศที่ต้องการออกแบบ ในที่นี้ใช้ 476 MHz ดังรูปที่ 3.7 จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความยาวคลื่นให้โดยอัตโนมัติ (หมายเหตุ การเลือกความถี่ในการออกแบบสายอากาศสามารถเลือกทำได้ความถี่ใดๆ เนื่องจากในการใช้งานจริงสามารถทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ปฏิบัติการในการใช้งานได้ โดยการปรับความยาวของส่วนที่เป็นไดโพล)

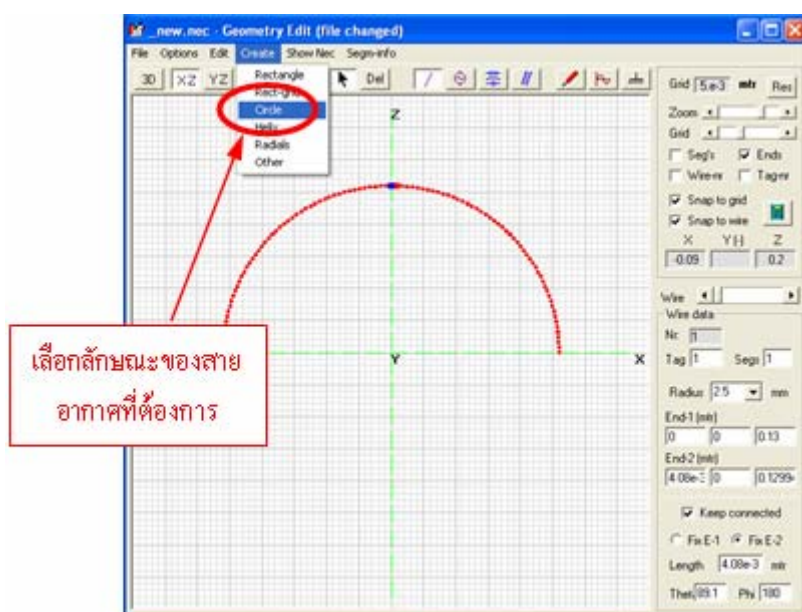


รูปที่ 3.7 การป้อนค่าความถี่สายอากาศที่ต้องการออกแบบ

3) การออกแบบสายอากาศไดโพลโค้ง

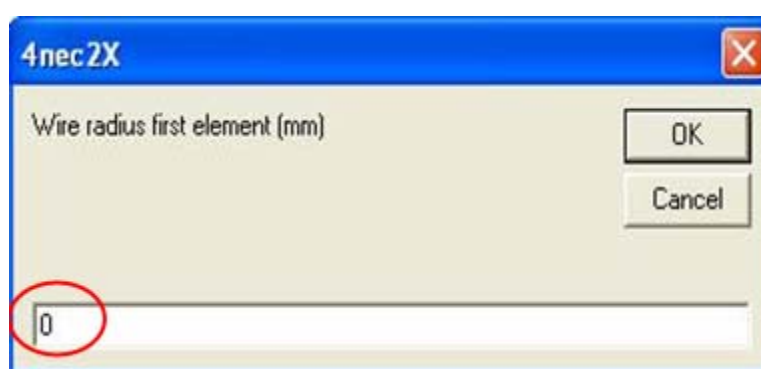
ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบสายอากาศไดโพลโค้งโดยการหาค่ารัศมีความโค้ง ความกว้างของสายอากาศไดโพลโค้ง และความยาวของตัวสายอากาศที่เหมาะสม แล้วเลือกพิจารณาสายอากาศที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง 50Ω มากที่สุด และมีค่ารีแอक्टแดนซ์ ใกล้เคียง 0Ω เพื่อไม่ให้เกิดการเรโซแนนซ์ในสายอากาศ

ซึ่งในโครงงานฉบับนี้เริ่มจากการทดลองออกแบบรัศมีความโค้งของสายอากาศไดโพลที่ 10, 11 และที่ 12 เซนติเมตร และทดลองออกแบบความกว้างของสายอากาศไดโพลโค้งที่ 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร

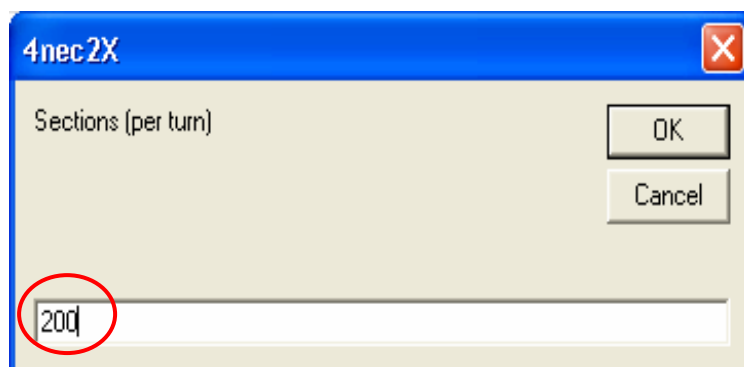


รูปที่ 3.8 รูปการออกแบบสายอากาศไดโพลโค้ง

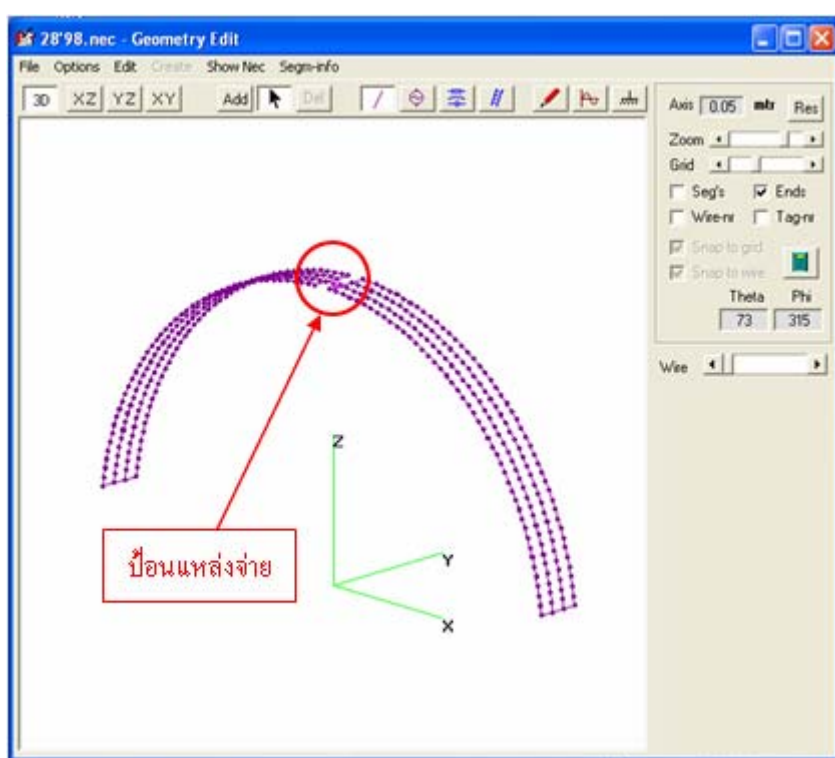
วาดรูปโครงสร้างสายอากาศไดโพลโค้งโดยในโปรแกรม 4NEC2 จะทำการออกแบบโดยการสร้างเป็นวงกลมโดยเลือกที่เมนู Create ---> Circle แล้วตัดให้เป็นรูปโค้งแล้วใส่แผ่นสะท้อนตามต้องการ โดยที่ในการออกแบบสายอากาศจะต้องมีการกำหนดรัศมีของสายอากาศและจำนวน Sections ที่ต้องการภายในสายอากาศนั้นๆ แต่ในที่นี้ตัวสายอากาศไดโพลโค้งมีลักษณะเป็นแผ่นจึงไม่รัศมีของท่อสายอากาศ



รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงขนาดรัศมีของสายอากาศที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ



รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงจำนวน Sections ภายในสายอากาศ



รูปที่ 3.11 การออกแบบสายอากาศพร้อมทั้งลักษณะการป้อนแหล่งจ่าย


ในการป้อนแหล่งจ่ายที่ส่วนต้นของสายอากาศให้ทำการปรับเช็กเมนต์เพิ่มขึ้นก่อน เพื่อให้สายอากาศแต่ละส่วนถูกแบ่งย่อยเป็นส่วนๆ ที่เล็กลงซึ่งจะทำให้สามารถทำการวาดจุดป้อนแหล่งจ่ายได้ใกล้กับต้นสายอากาศมากขึ้น ซึ่งการปรับเช็กเมนต์สามารถทำได้โดยเลือกที่ไอคอน

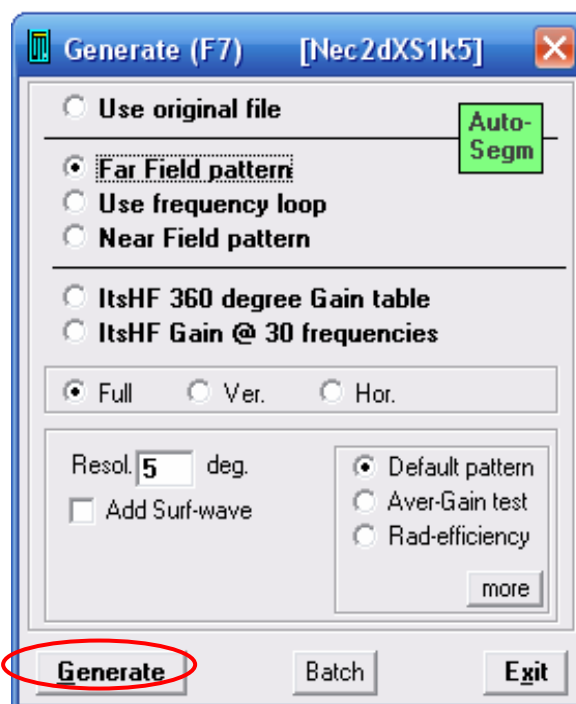


จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.12 และในโครงงานนี้ได้ทำการปรับเช็คเมนต์ให้มีค่าเท่ากับ 25 ซึ่งเป็นค่าขนาดกลางของโปรแกรม

| Wire | Tag | Segs | X1 (mtr) | Y1 (mtr) | Z1 (mtr) | X2 (mtr) | Y2 (mtr) | Z2 (mtr) | rad (mm) |
|------|-----|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 25 | 0.05 | 0.28 | 0 | 0.25 | 0.025 | 0 | 12.5 |
| 2 | 2 | 25 | 0.25 | -0.025 | 0 | 0.05 | -0.28 | 0 | 12.5 |
| 3 | 3 | 25 | -0.15 | -0.02 | 0 | 0.05 | -0.28 | 0 | 12.5 |
| 4 | 4 | 25 | 0.05 | 0.28 | 0 | -0.15 | 0.02 | 0 | 12.5 |
| 5 | 5 | 25 | 0.25 | -0.025 | 0 | 0.25 | 0.025 | 0 | 12.5 |
| 6 | 6 | 25 | -0.15 | -0.02 | 0 | -0.15 | 0.02 | 0 | 12.5 |
| | | | | | | | | | |

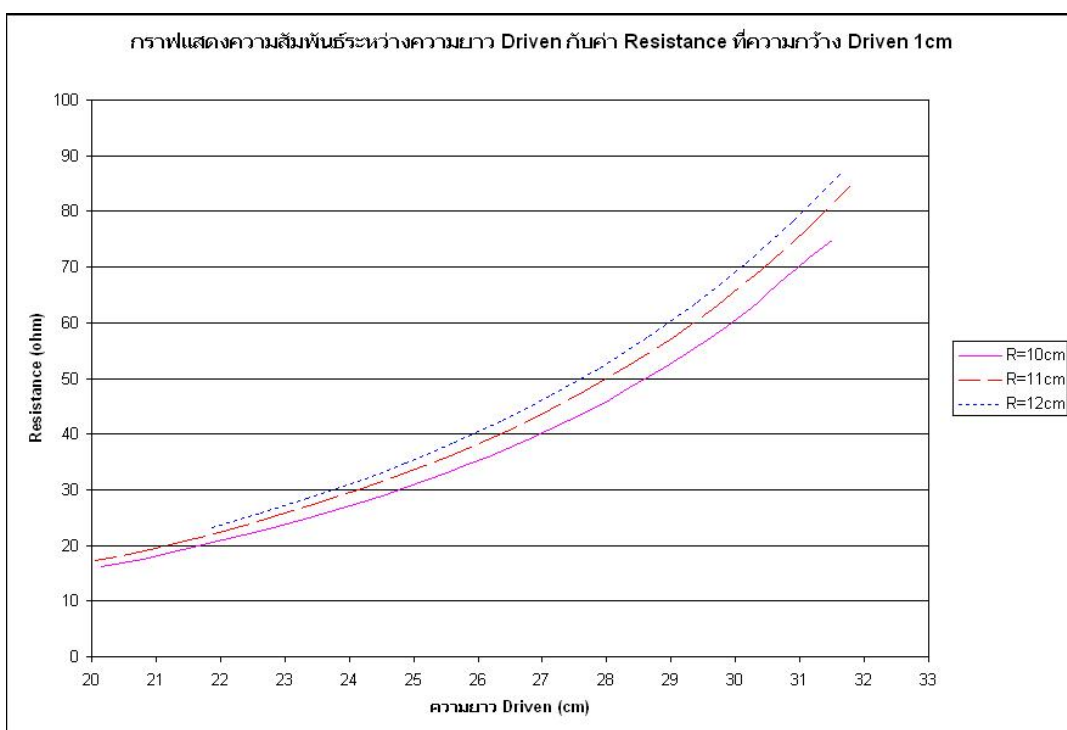
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งและค่าในการปรับเช็คเมนต์

จากนั้นทำการคำนวณด้วยโปรแกรมเพื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าโดยการเลือกไอคอนเจเนอเรท  ที่อยู่ด้านขวาของหน้าต่าง สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ต้องการคือ $Z_{in} = 50 \pm jX$ เพื่อให้เข้ากันกับสายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม ส่วนค่าที่เป็นจำนวนจินตภาพจะมีค่าเท่าใดก็ได้ แต่ควรจะมีค่าน้อยๆ หลังจาก que เลือกที่ไอคอนเจเนอเรทแล้วจะปรากฏหน้าต่างออกมา จากนั้นให้เลือกที่คำสั่ง Far Filed pattern จากนั้นกดปุ่ม **Generate** ดังรูปที่ 3.13

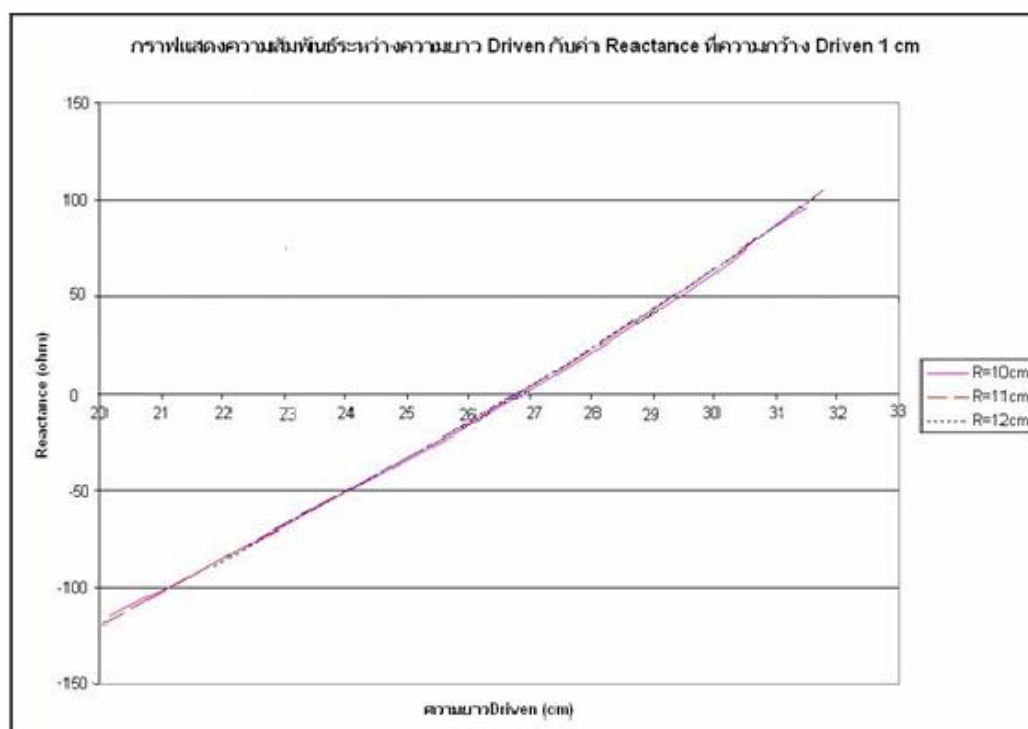


รูปที่ 3.13 หน้าต่าง Generate

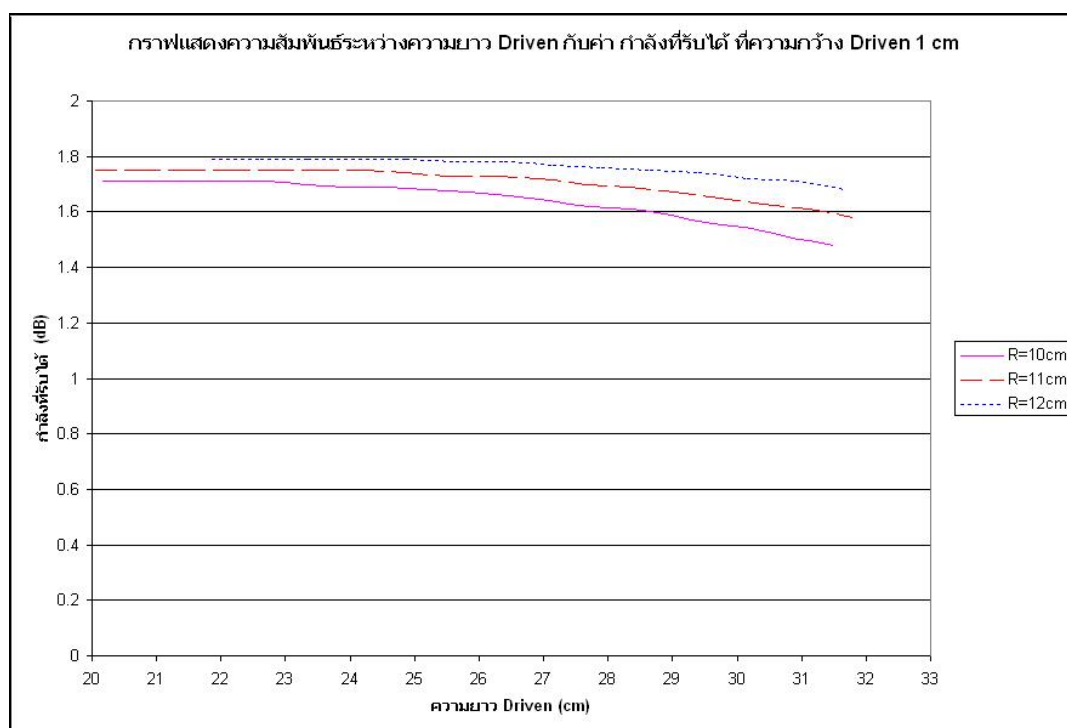
หลังจากที่เรากดปุ่ม **Generate** แล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ในขั้นตอนนี้เราจะทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่โปรแกรมคำนวณมาทำการเปรียบเทียบแต่ละค่าที่ได้จากการออกแบบและพิจารณาเลือกสายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม คือสายอากาศจะต้องมีค่าความต้านทานใกล้เคียง $50\ \Omega$ มากที่สุด และมีค่ารีแอคแตนซ์ ใกล้เคียง $0\ \Omega$ เพื่อไม่ให้เกิดการเรโซแนนซ์ในสายอากาศ เพื่อง่ายต่อการพิจารณาเราได้แสดงผลการทดลองทั้งหมดในรูปแบบของกราฟ ดังต่อไปนี้



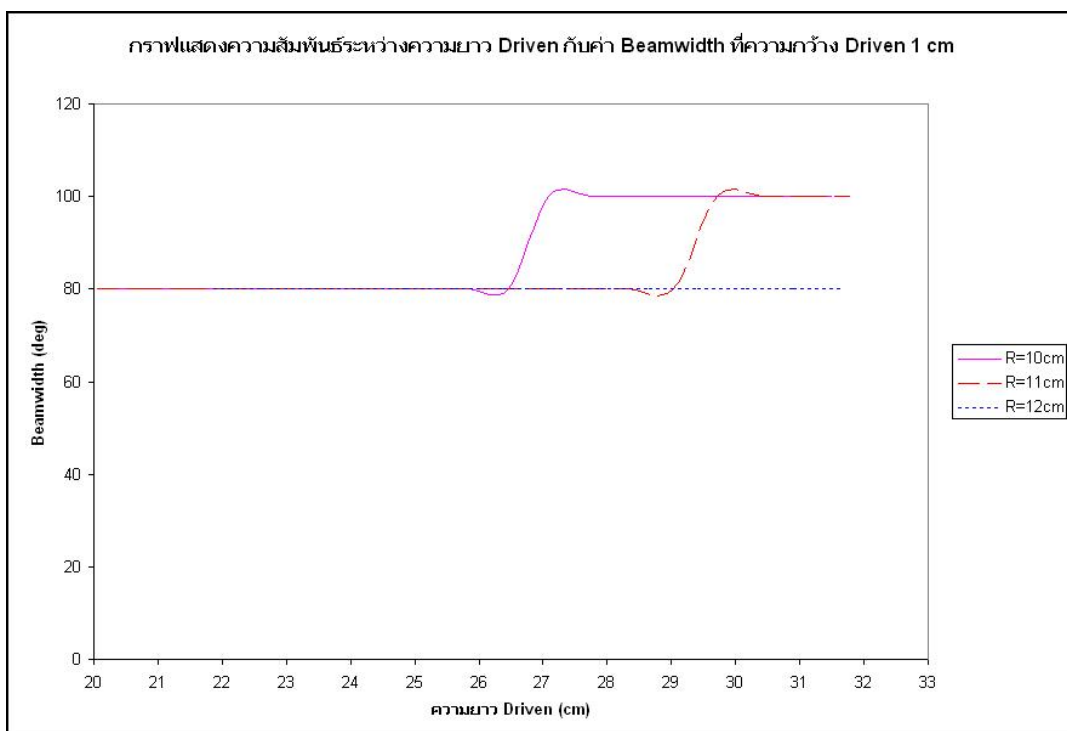
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความต้านทาน ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm



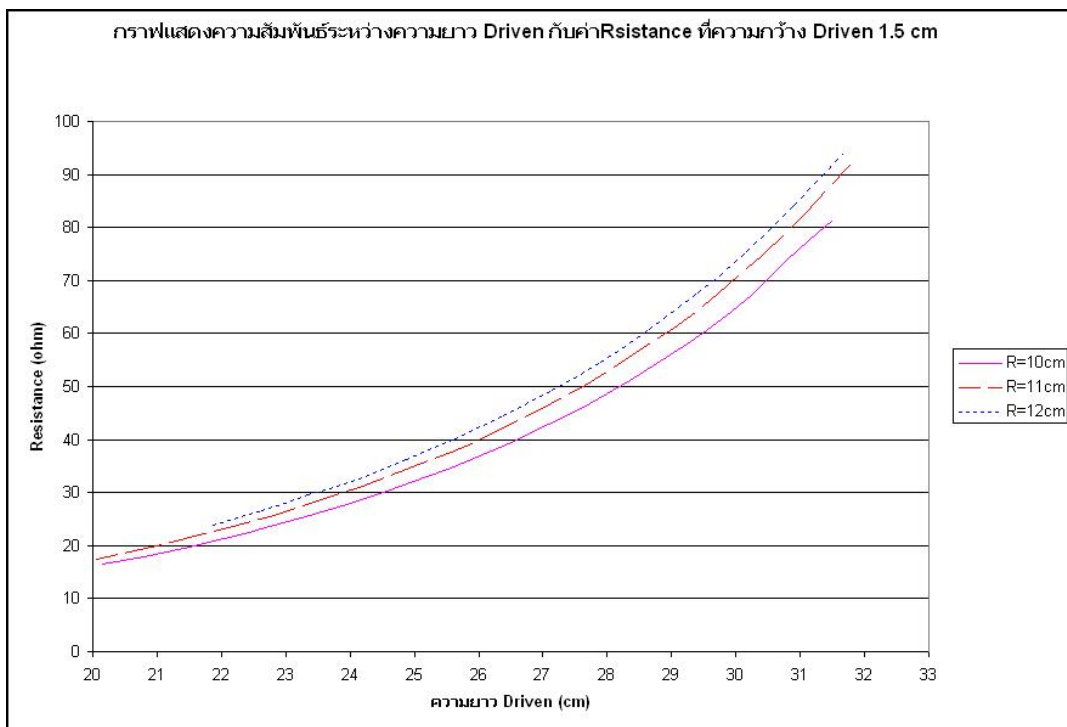
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ารีแอคแตนซ์
ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ากำลังที่รับได้
ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm



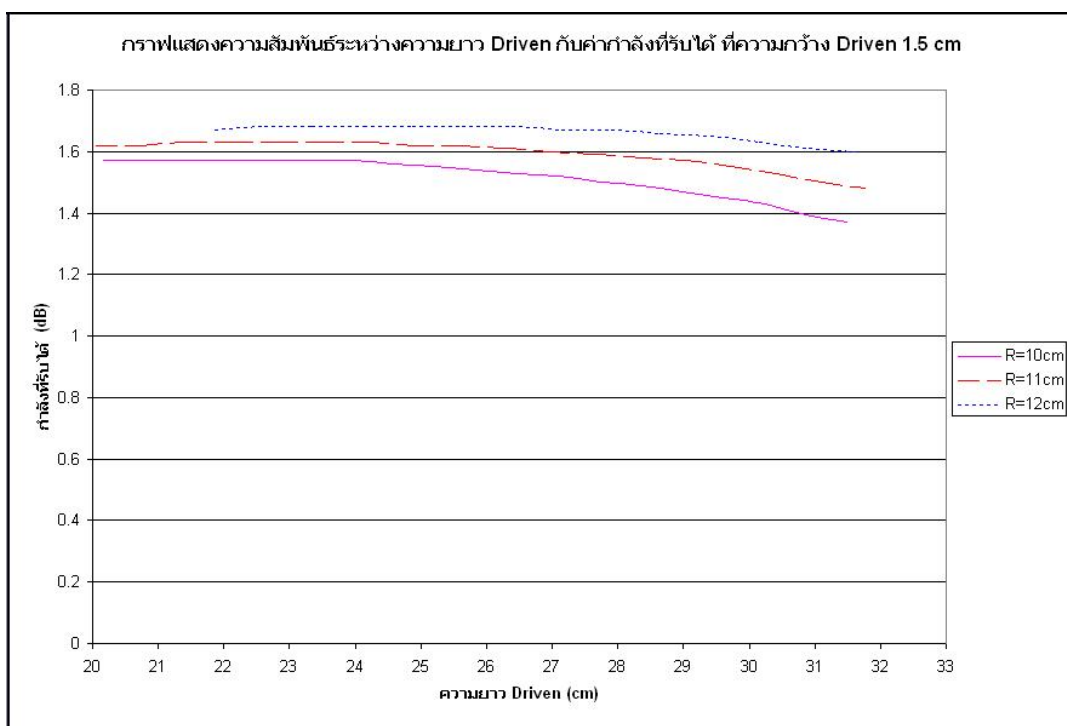
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความกว้างแถบ (Beamwidth) ที่ความกว้างสายอากาศ 1cm



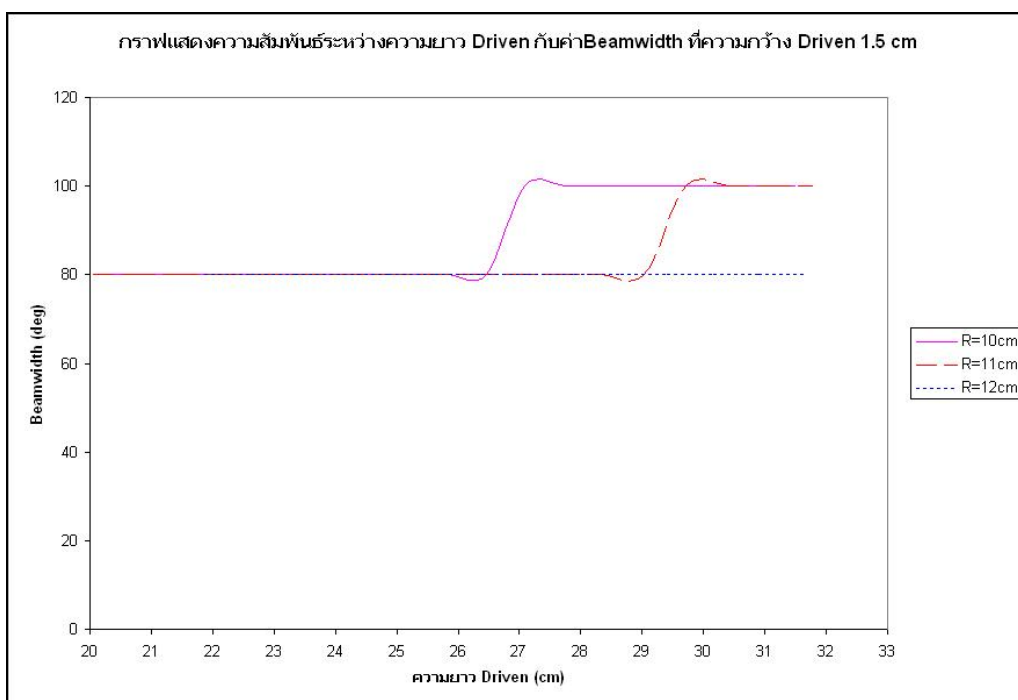
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความต้านทาน ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm



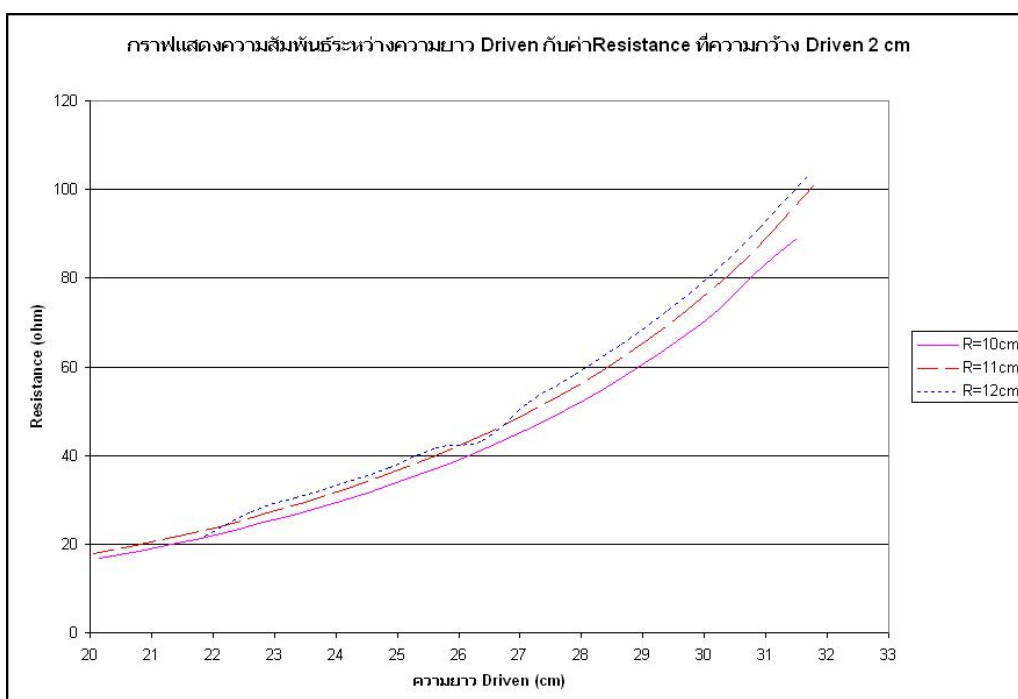
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ารีแอคแตนซ์
ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ากำลังที่รับได้
ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm



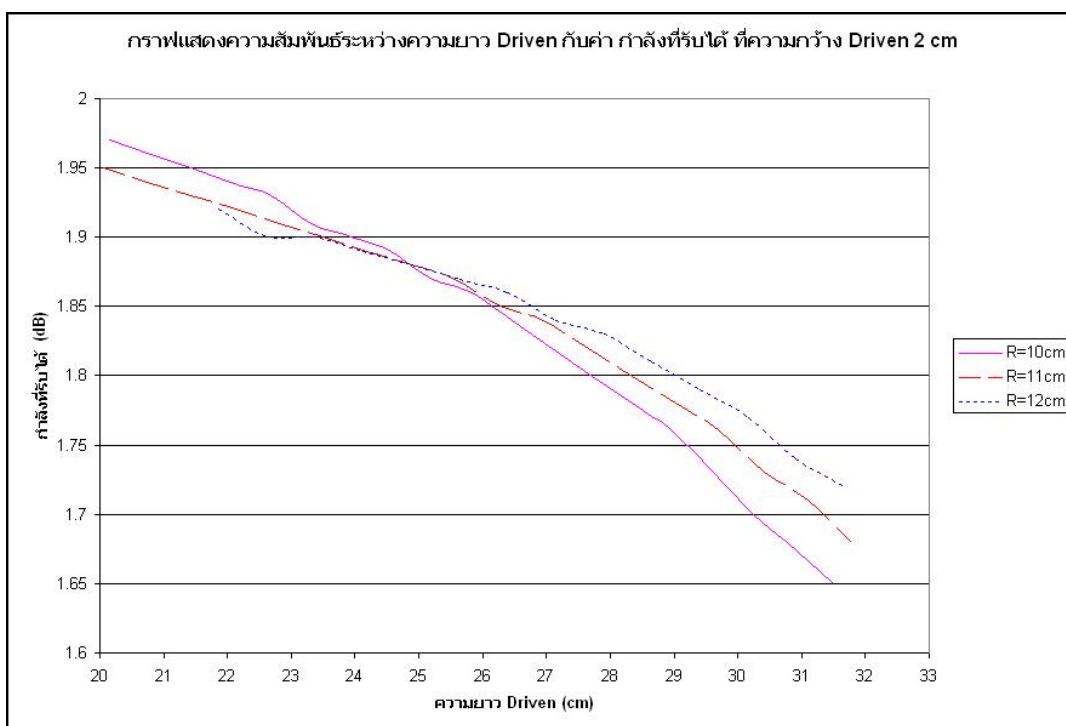
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความกว้างแถบ (Beamwidth) ที่ความกว้างสายอากาศ 1.5 cm



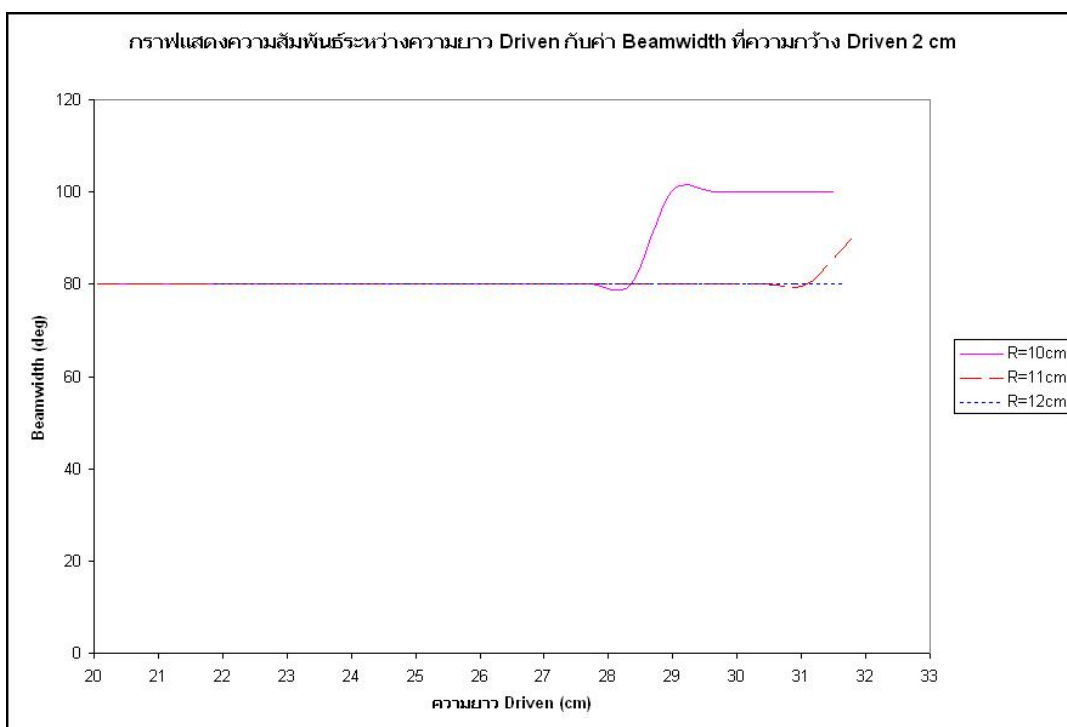
รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความต้านทาน ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ารีแอคแตนซ์
ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm



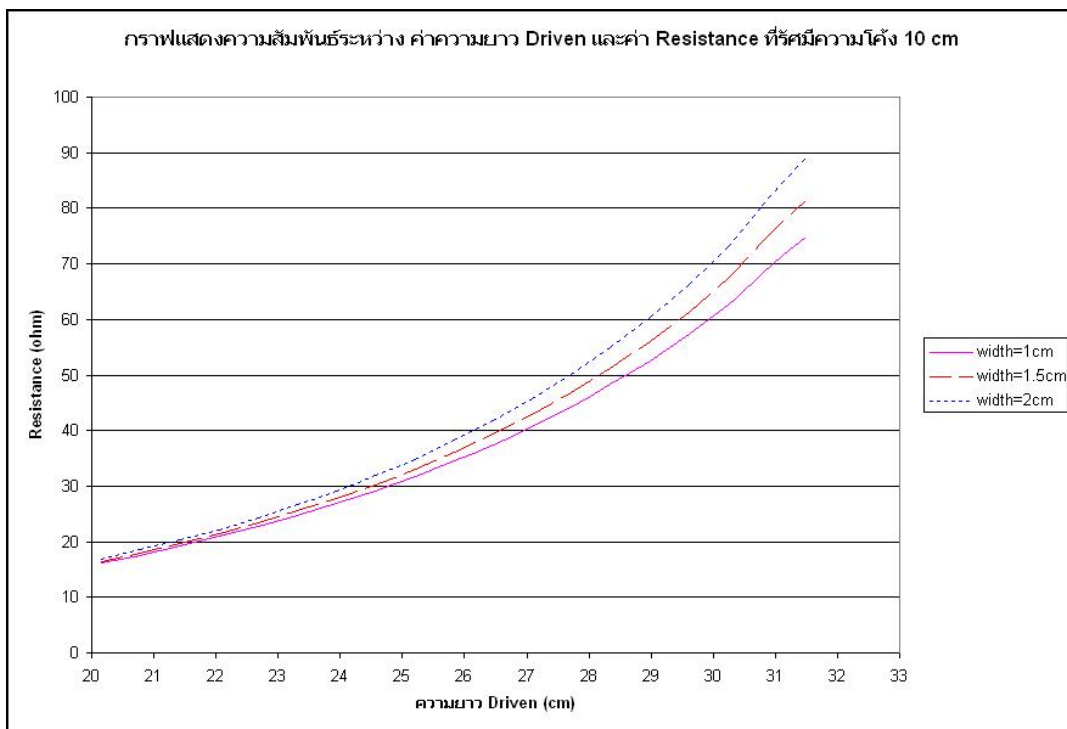
รูปที่ 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่ากำลังที่รับได้
ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm



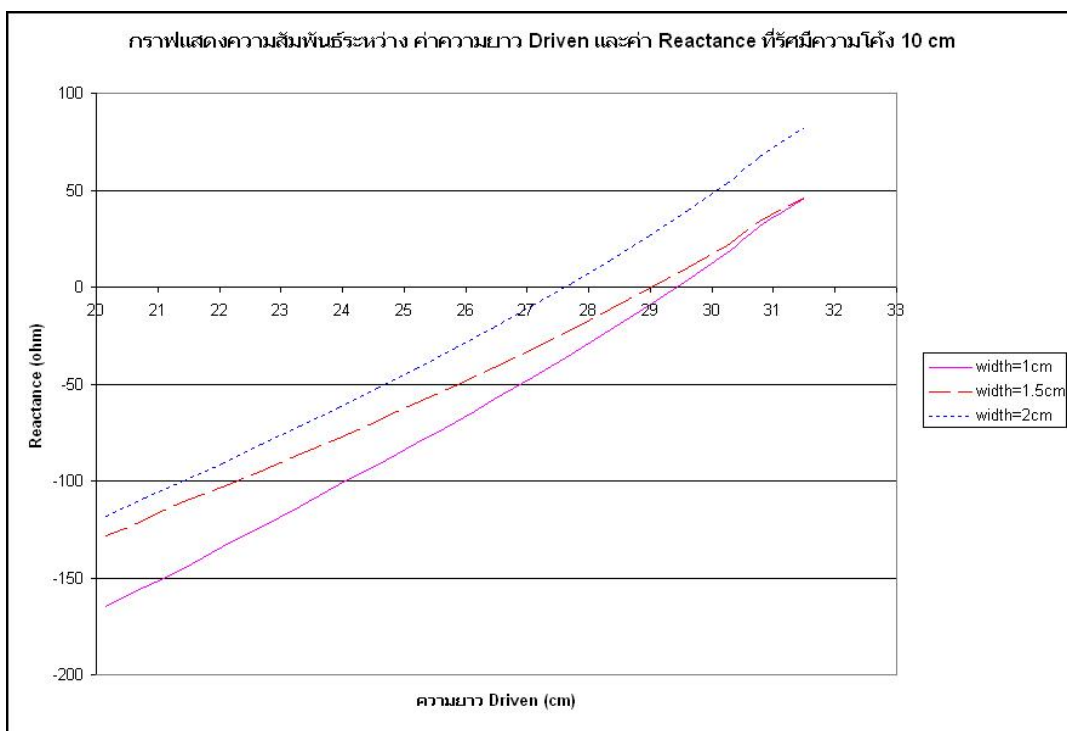
รูปที่ 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับค่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ที่ความกว้างสายอากาศ 2 cm

จากกราฟแสดงผลจากรูปที่ 3.14 ถึงรูปที่ 3.25 นั้นเราพบว่าที่ความยาวสายอากาศเท่ากัน รัศมีมีความโค้งที่มีค่าน้อยจะมีค่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) มากกว่าสายอากาศที่มีรัศมีมีความโค้งมาก เราจึงเลือกตัวสายอากาศที่มีรัศมีมีความโค้งน้อยที่สุด คือ 10 เซนติเมตร

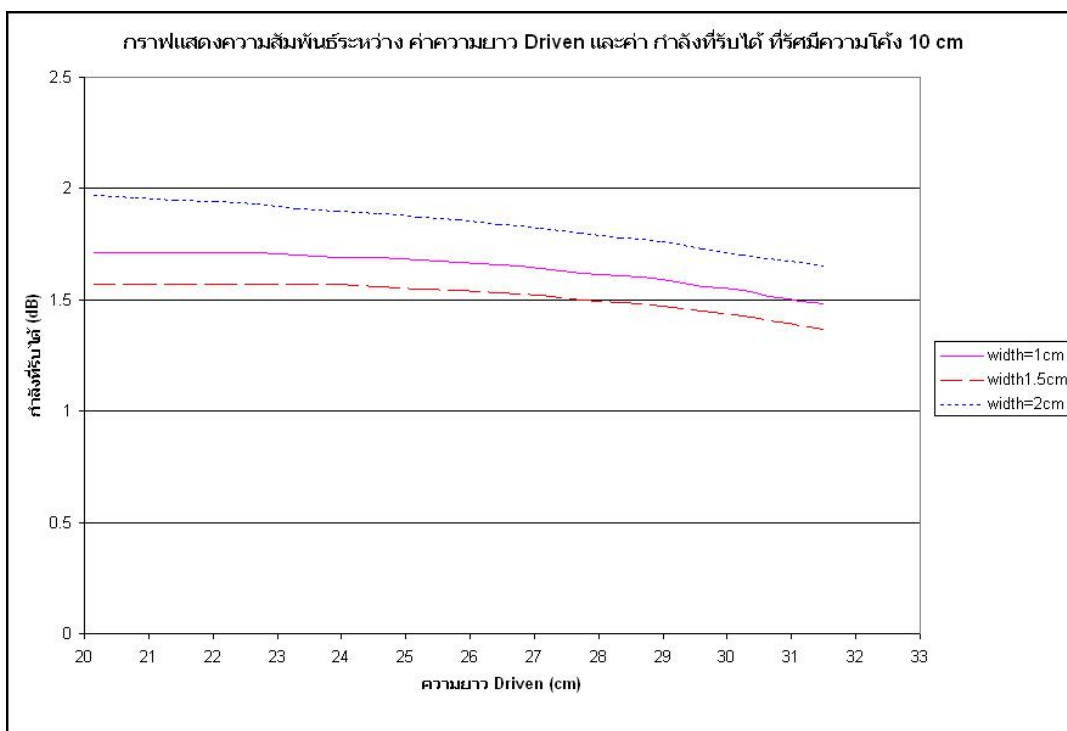
หลังจากนั้นพิจารณาเลือกความกว้างตัวสายอากาศที่ให้ค่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) มากที่สุด มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง 50 Ω มากที่สุด และมีค่ารีแอคแตนซ์ ใกล้เคียง 0 Ω เพื่อไม่ให้เกิดการเรโซแนนซ์ในสายอากาศ ซึ่งในโครงงานฉบับนี้ทดลองออกแบบความกว้างของสายอากาศได้โพลที่ 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร โดยแสดงผลเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งสามค่ากับค่ารัศมีมีความโค้งที่ 10 เซนติเมตร เพื่อง่ายต่อการพิจารณาเราได้แสดงผลการทดลองทั้งหมดในรูปแบบของกราฟดังต่อไปนี้



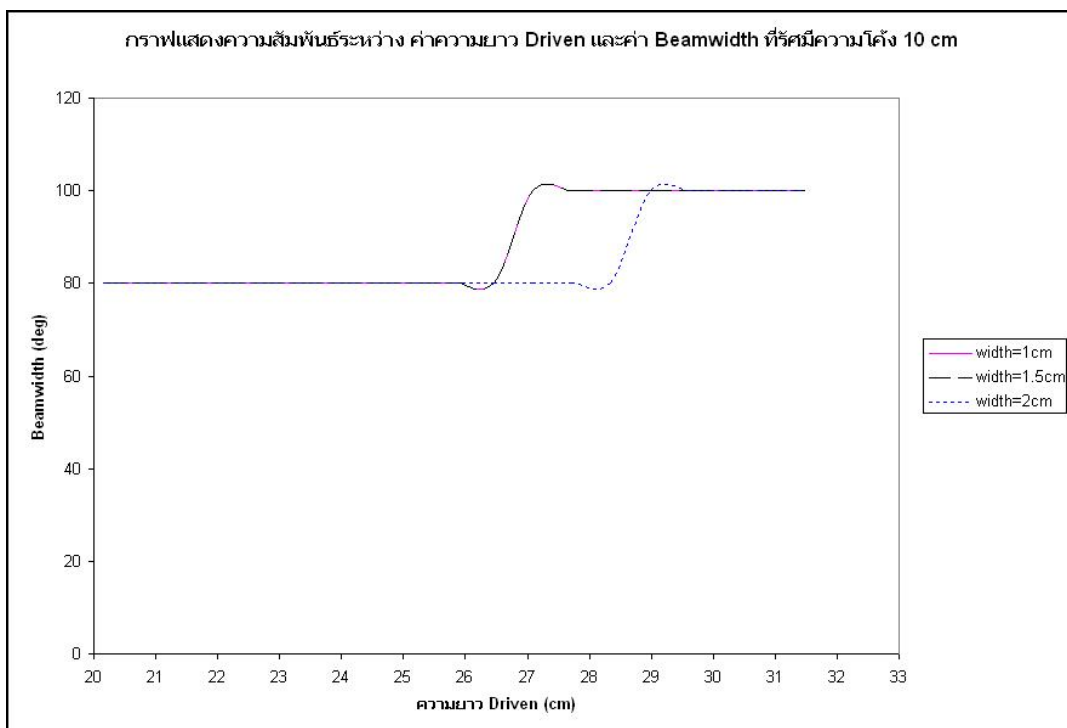
รูปที่ 3.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่าความต้านทาน
กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm



รูปที่ 3.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่ารีแอคแตนซ์
กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm

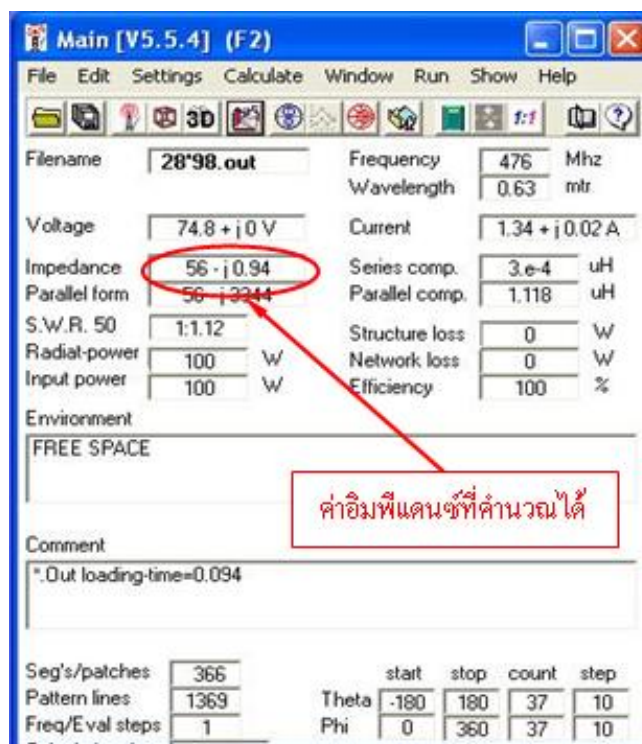


รูปที่ 3.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่ากำลังที่รับได้
กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm



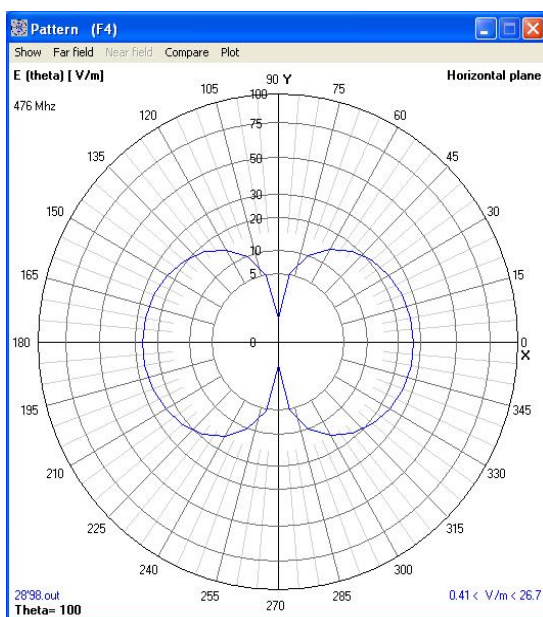
รูปที่ 3.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความกว้างของสายอากาศระหว่างค่าความกว้างลำคลื่น
(Beamwidth) กับค่าความยาวของสายอากาศที่รัศมีความโค้ง 10 cm

จากรูปที่ 3.26 ถึงรูปที่ 3.29 จะเห็นว่าสายอากาศที่มีความกว้างที่ 1.5 เซนติเมตร นั้นให้ค่าความกว้างลำคลื่น(Beamwidth) มากที่สุด มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง 50 Ω มากที่สุด และมีค่ารีแอคแตนซ์ ใกล้เคียง 0 Ω มากที่สุดด้วย ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ ดังรูปที่3.30

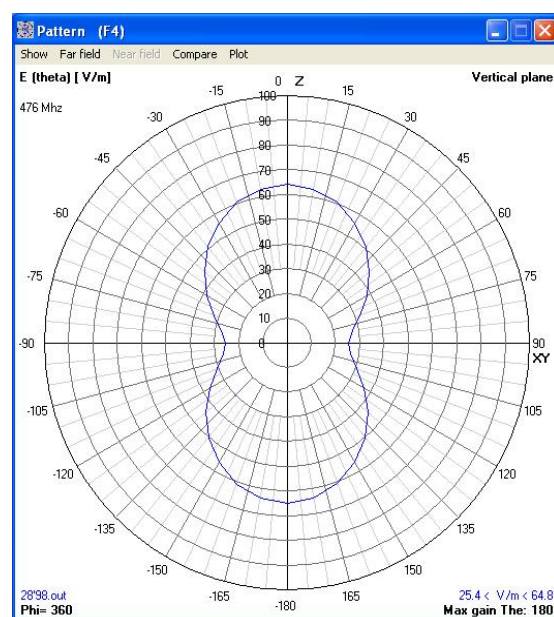


รูปที่ 3.30 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศไดโพลโค้ง

จากรูปที่ 3.30 เราได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวสายอากาศไดโพลโค้ง ซึ่งมีรัศมีความโค้งเท่ากับ 10 เซนติเมตร มีความยาว $L = 28.98$ เซนติเมตร มีความกว้างของตัวสายอากาศเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $56 - j0.94 \Omega$ มีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ 1.47 dB มีค่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) เท่ากับ 100 องศา สาเหตุที่เราพิจารณาเลือกค่าเหล่านี้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่า Resistance ใกล้เคียง 50 Ω และมีค่า Reactance ใกล้เคียง 0 Ω และมีค่า Beamwidth 100 องศา ซึ่งมากกว่า 80 องศา ตามที่ได้กล่าวในบทที่ 2 สายอากาศที่เราพิจารณาเลือกมีแบบรูปการแผ่กำลังงานดังรูปที่ 3.31



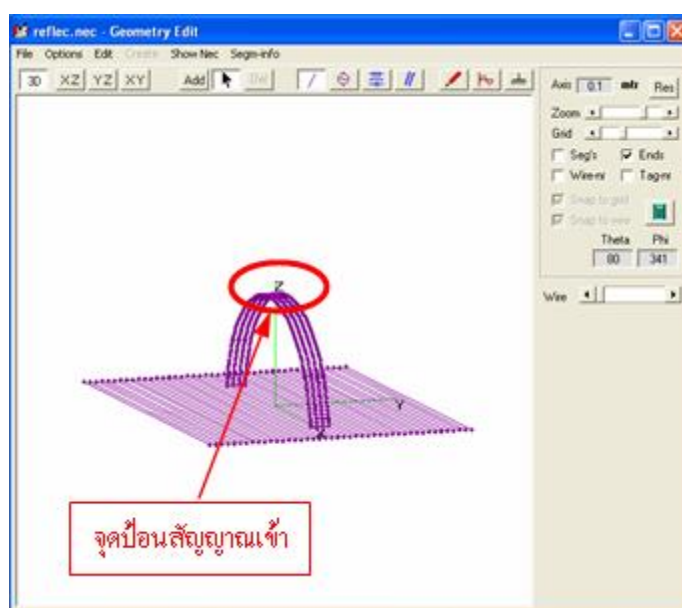
E-Plane



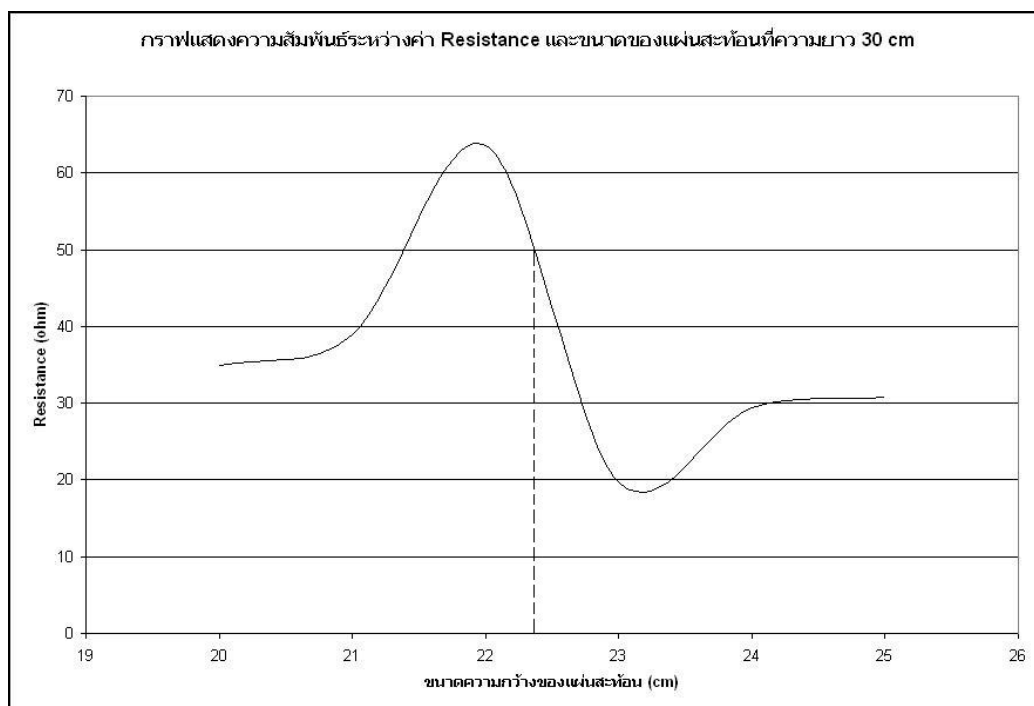
H-Plane

รูปที่ 3.31 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง

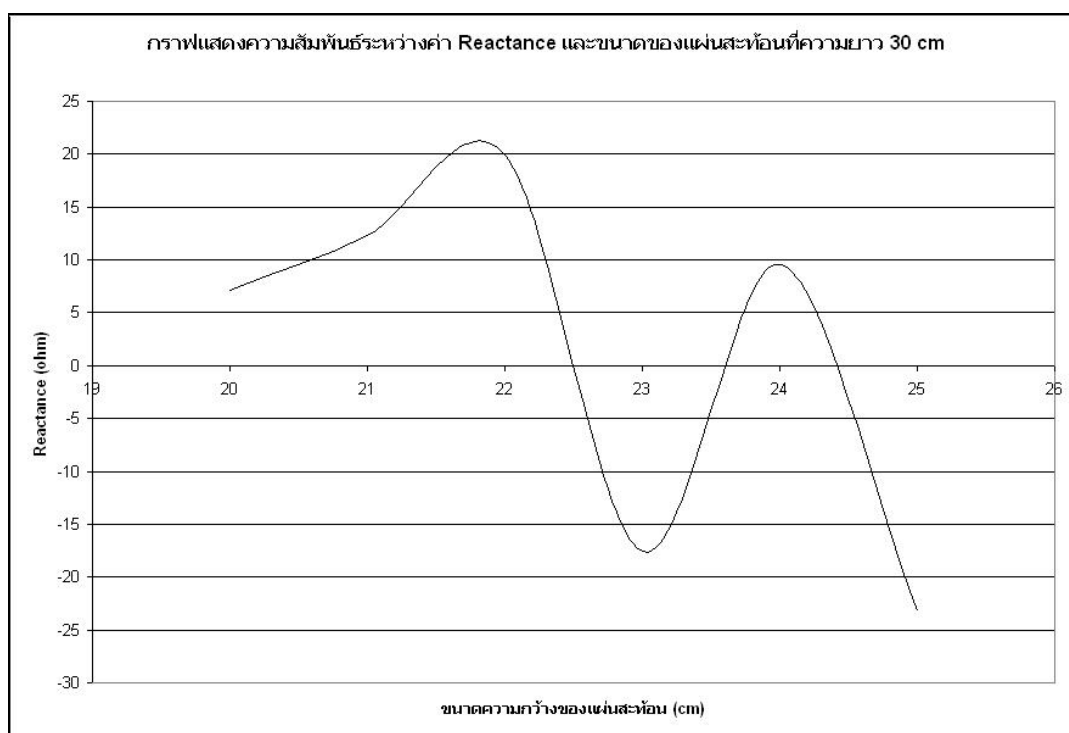
หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวสายอากาศไดโพลโค้งแล้วต่อไปเราจะนำตัวสายอากาศที่ได้ไปทดลองออกแบบใส่แผ่นสะท้อนแล้วลัดวงจรเพื่อให้เป็นสายอากาศโครงสร้างเดียวกัน



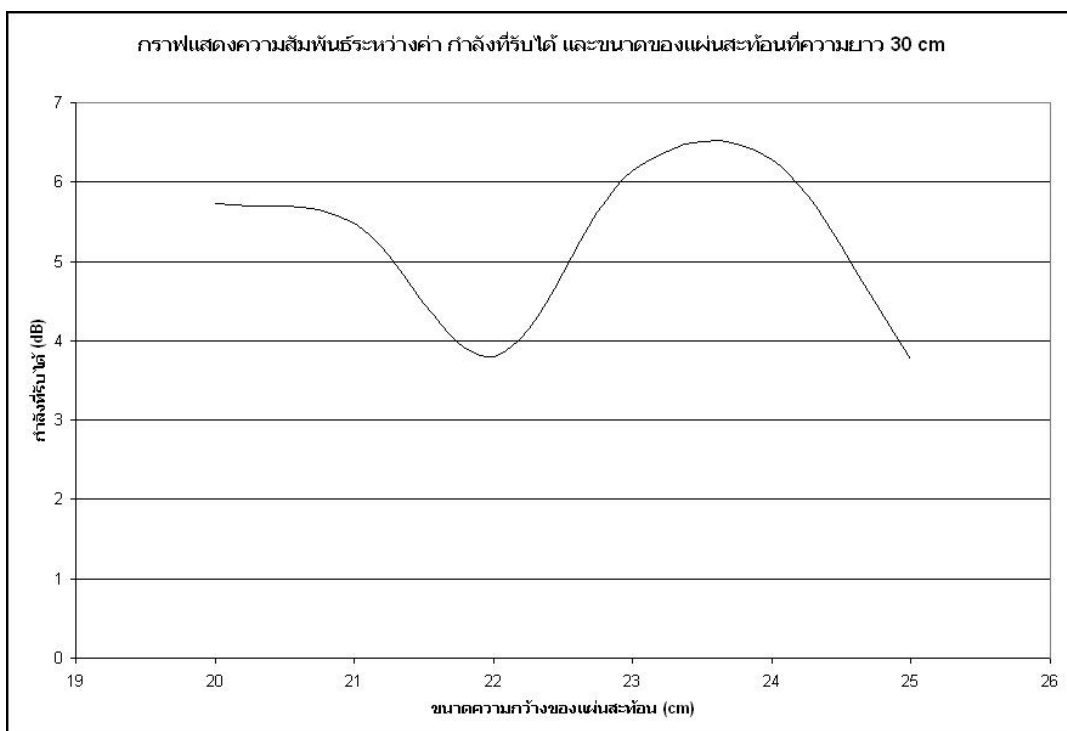
รูปที่ 3.32 การออกแบบสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อน



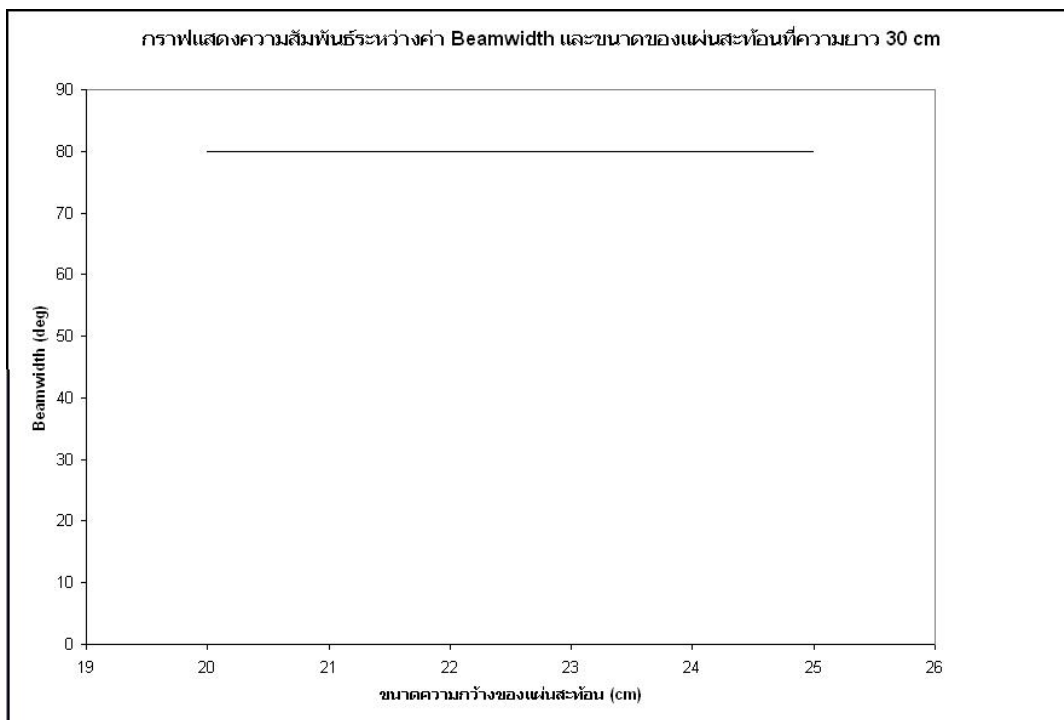
รูปที่ 3.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่าความต้านทาน ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm



รูปที่ 3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่ารีแอคแตนซ์ ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm

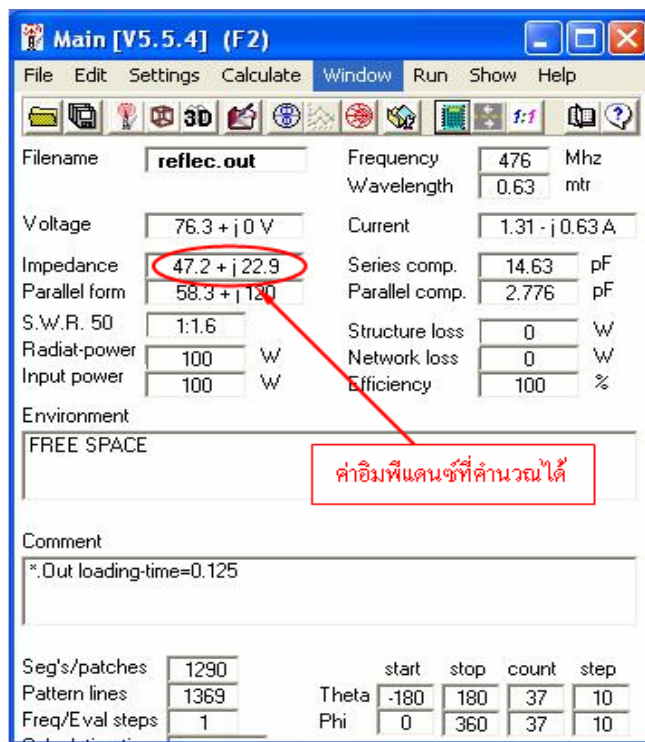


รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่า กำลังที่รับได้ ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm



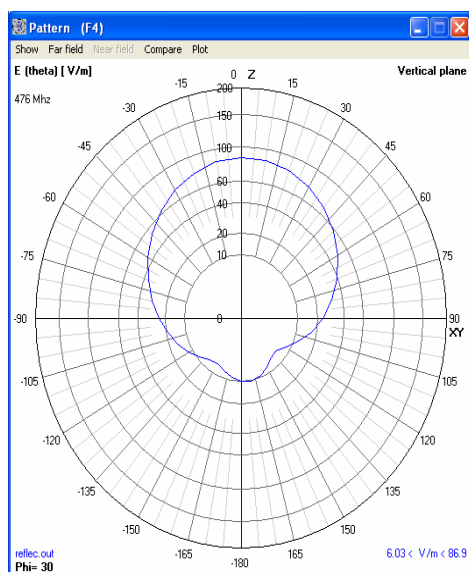
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นสะท้อนและค่าความกว้าง ลำคลื่น (Beamwidth) ที่ความยาวแผ่นสะท้อน 30 cm

จากรูปที่ 3.33 ถึงรูปที่ 3.36 จะเห็นว่าขนาดของแผ่นตัวสะท้อนที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง $50\ \Omega$ มากที่สุด และมีค่ารีเอกแตนซ์ ใกล้เคียง $0\ \Omega$ คือที่ความกว้าง 22.4 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ ดังรูปที่ 3.37

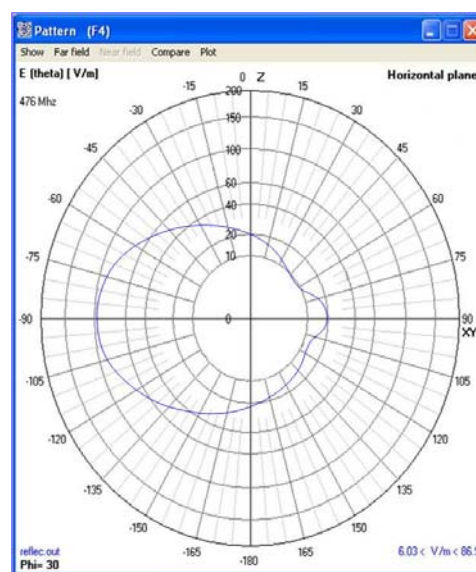


รูปที่ 3.37 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อน

จากรูปที่ 3.37 เราได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ซึ่งมีรัศมีความโค้ง เท่ากับ 10 เซนติเมตร มีความยาว $L = 28.98$ เซนติเมตร มีความกว้างของตัวสายอากาศเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ขนาดของแผ่นตัวสะท้อนมีความกว้าง 22.4 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $47.2 + j22.9\ \Omega$ มีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ 5.28 dB มีค่า ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) เท่ากับ 80 องศา สายอากาศที่เราพิจารณาเลือกมีแบบรูปการแผ่กำลังงานดังรูปที่ 3.38



E-Plane



H-Plane

รูปที่ 3.38 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

3.5 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบวิเคราะห์สายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนโดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 หรือ 4NEC2 เพื่อดูแนวทางการเป็นไปได้ของสายอากาศโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศไดโพลโค้งจะต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญคือค่าความถี่ที่ต้องการออกแบบรัศมีของท่อนำมาทำสายอากาศ จำนวน Section ที่กำหนดก่อนที่จะทำการคำนวณซึ่งค่าที่คำนวณได้ก็คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง

จากการที่เราได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 หรือ 4NEC2 ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ซึ่งมีรัศมีความโค้ง เท่ากับ 10 เซนติเมตร มีความยาว $L = 28.98$ เซนติเมตร มีความกว้างของตัวสายอากาศเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ขนาดของแผ่นตัวสะท้อนมีความกว้าง 22.4 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $47.2 + j22.9 \Omega$ มีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ 5.28 dB มีค่า ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) เท่ากับ 80 องศา แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ต่าง ๆ นี้ เปรียบเทียบกับการวัดสายอากาศต้นแบบจริง ต่อไปในปีที่ 4

บทที่ 4

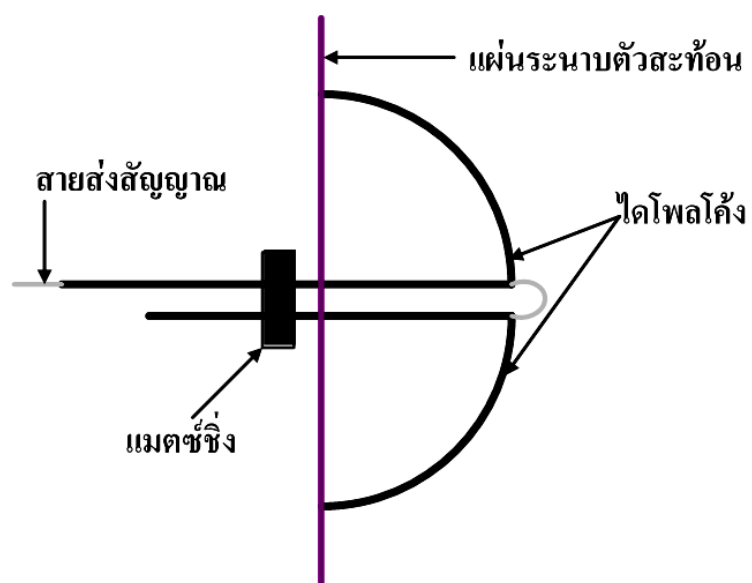
ผลการทดลองและการวัดสายอากาศ

4.1 กล่าวนำ

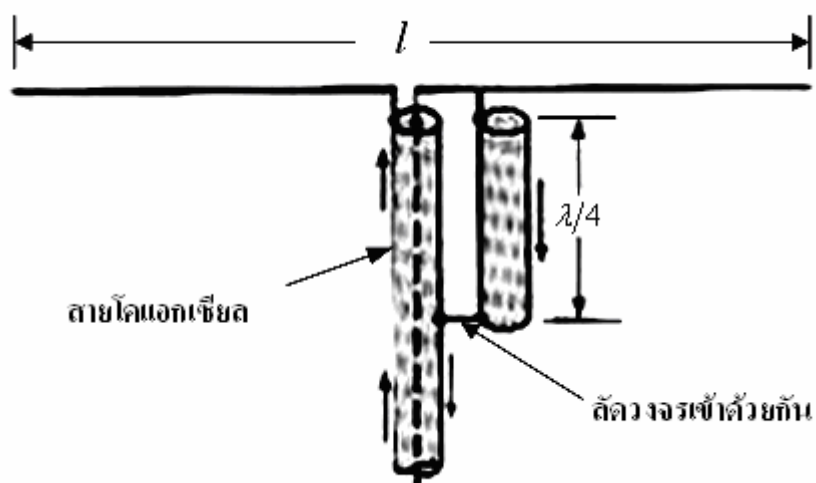
ในบทนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 มาใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบจริงและวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ซึ่งได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์และนำมาวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio : SWR) ความกว้างแถบสายอากาศ และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8722D ซึ่งในการออกแบบได้ใช้ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ความถี่ 476 MHz เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 ต่อไป

4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

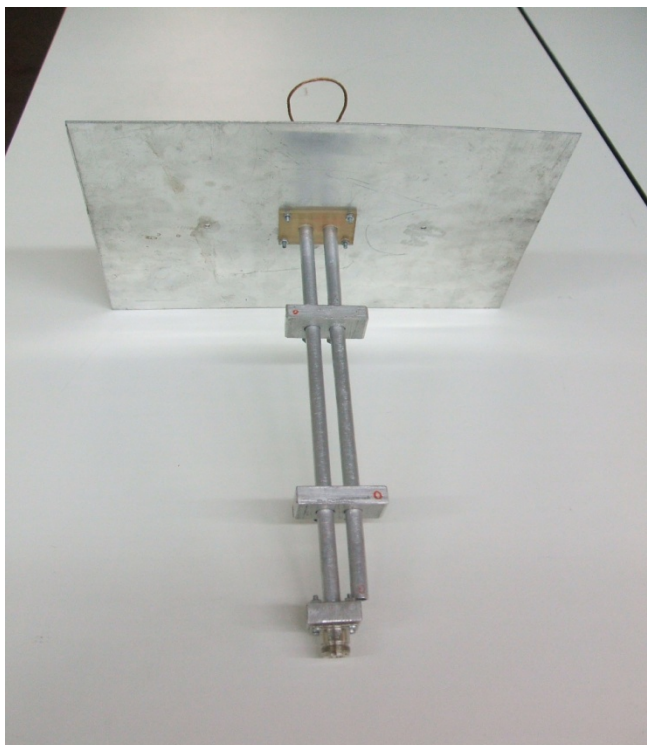
จากการนำโครงสร้างของสายอากาศไดโพล มาประยุกต์เพื่อให้ได้โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในตอนแรกได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ นำมาวัดเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 เพื่อจะนำไปสู่การสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนตามขนาดที่ได้จากการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 แต่ในการติดตั้งสายอากาศใช้งานจริง ต้องทำการแมตซ์ซิ่ง เพื่อให้สายอากาศที่สามารถใช้งานได้จริงในความถี่ที่ต้องการ สำหรับโครงงานฉบับนี้ได้ทำการแมตซ์สายอากาศ กับสายโคแอกเชียล 50 โอห์ม โดยเลือกใช้บัตตันโคแอกเชียล $\lambda/4$ (1:1) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



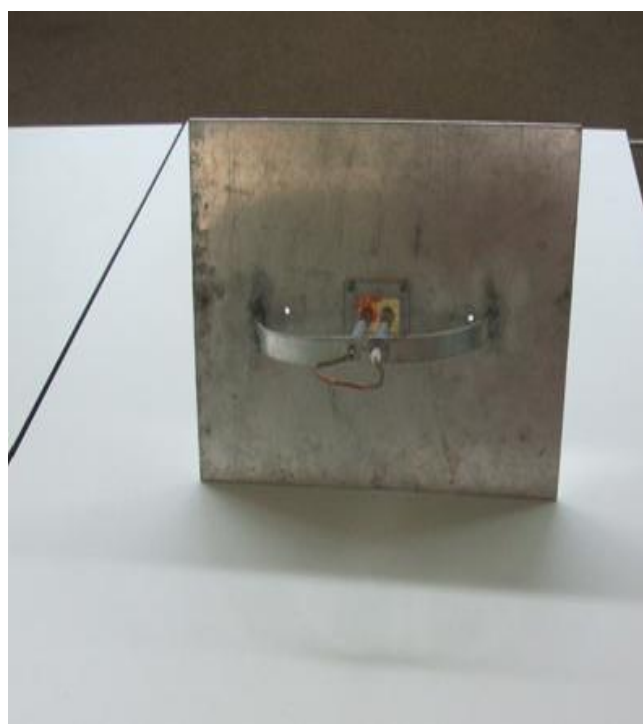
รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน



รูปที่ 4.2 บาลันแบบโคแอกเซียล $\lambda/4$ (1:1)



รูปที่ 4.3 แมตซ์ซิ่งของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์



รูปที่ 4.4 สายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์

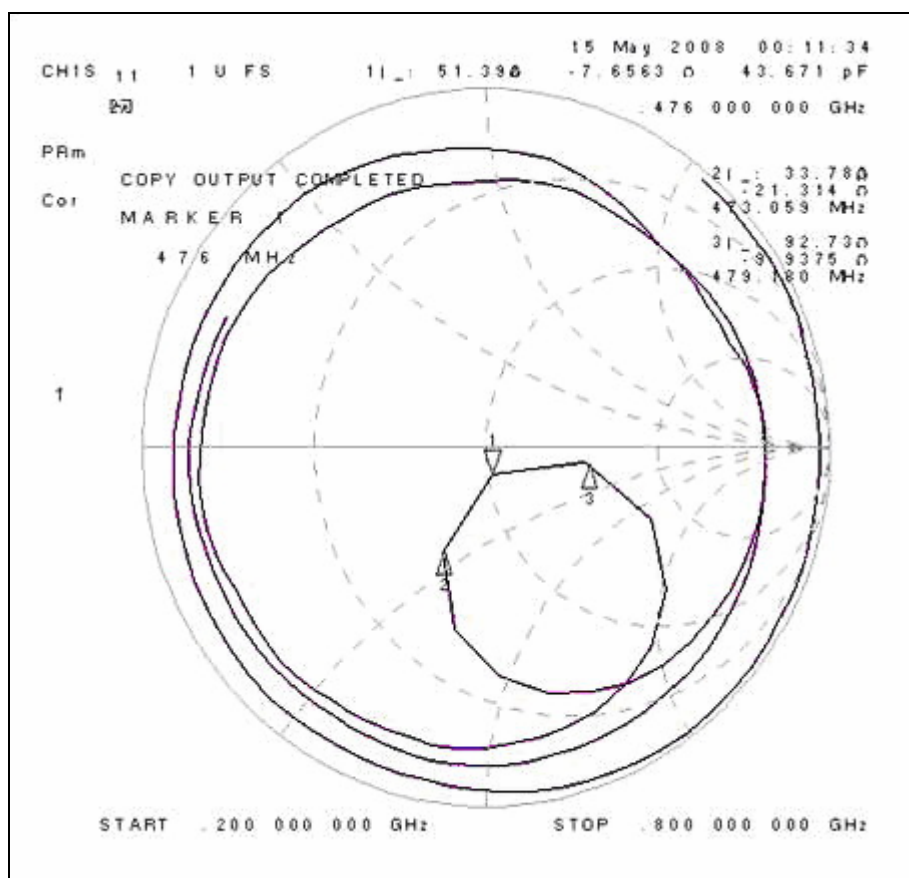
4.2.1 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก เพราะว่าหากสายอากาศไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณแล้วสายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง ๆ ได้ สำหรับโครงงานนี้ใช้สายนำสัญญาณแบบโคแอกเชียลที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้น สายอากาศแถวลำดับโคโพลโค้งลวดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ที่สร้างจะต้องมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เท่ากับ หรือใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด โดยสามารถดูจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่จะต้องไม่เกิน 1.5 dB

ขั้นตอนการวัดค่าอิมพีแดนซ์

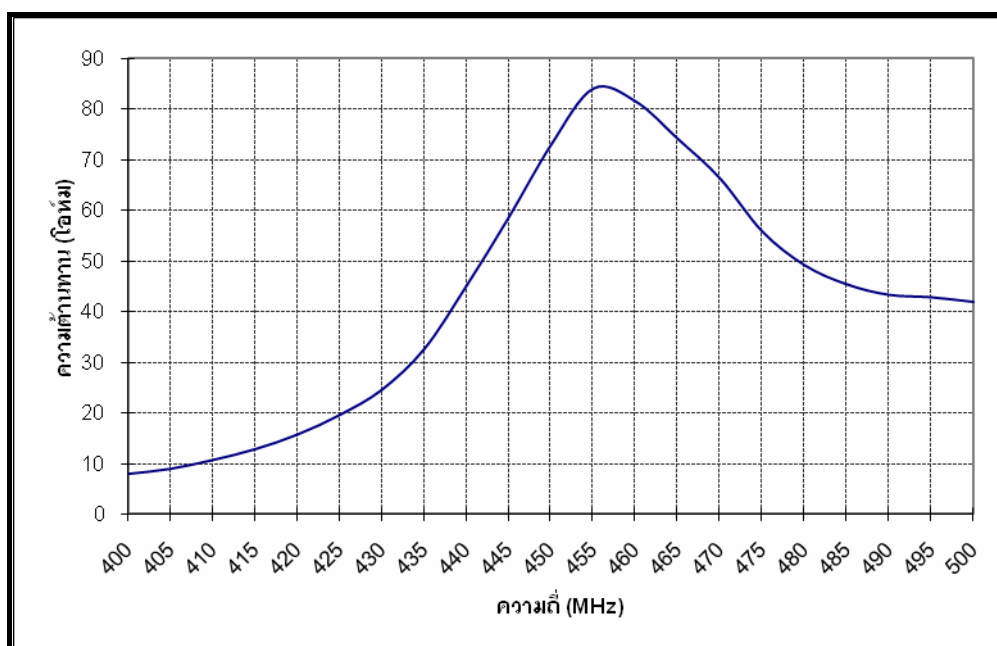
- ก) ทำการ Calibrate เครื่อง Network Analyzer ที่ความถี่ตั้งแต่ 200 MHz ถึง 800MHz
- ข) เลือกคำสั่ง Save เพื่อจะได้ไม่ต้องทำการเซตเครื่องใหม่ เมื่อมาใช้งานตอนหลังอีก
- ค) ต่อสายอากาศโคโพลโค้ง เข้าที่ Port 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D
- ง) ทำการวัด S₁₁ เลือก Format แบบ Smith Chart

11

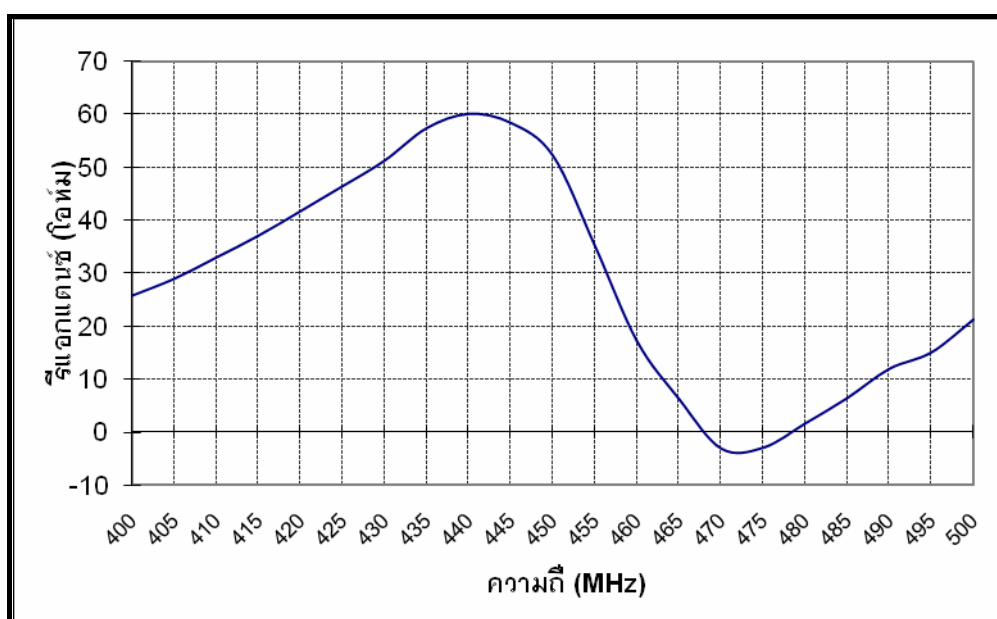


รูปที่ 4.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 476 MHz ของสายอากาศต้นแบบ

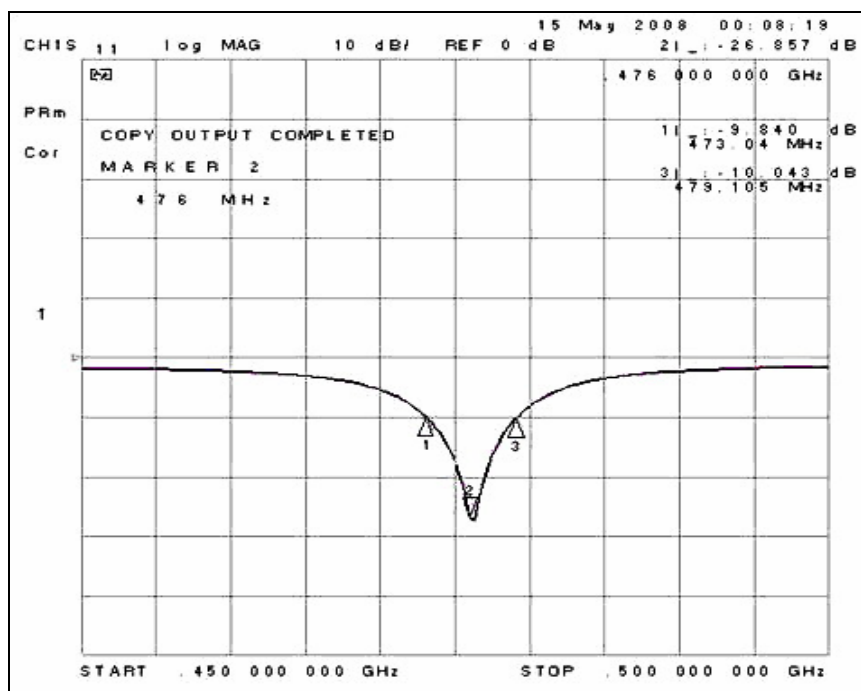
จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ความถี่ 476 MHz โดยดูค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการวัดได้จากกราฟ Smith Chart มีค่าเท่ากับ $51.39 - j7.65 \, \Omega$ และจากการทดลองได้นำค่าอิมพีแดนซ์และความถี่มาสร้างกราฟเพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองและค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณคือ $50 \, \Omega$ โดยแยกกราฟส่วนที่เป็นความต้านทาน (Resistance) และส่วนที่เป็นรีแอคแตนซ์ (Reactance) ของอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7



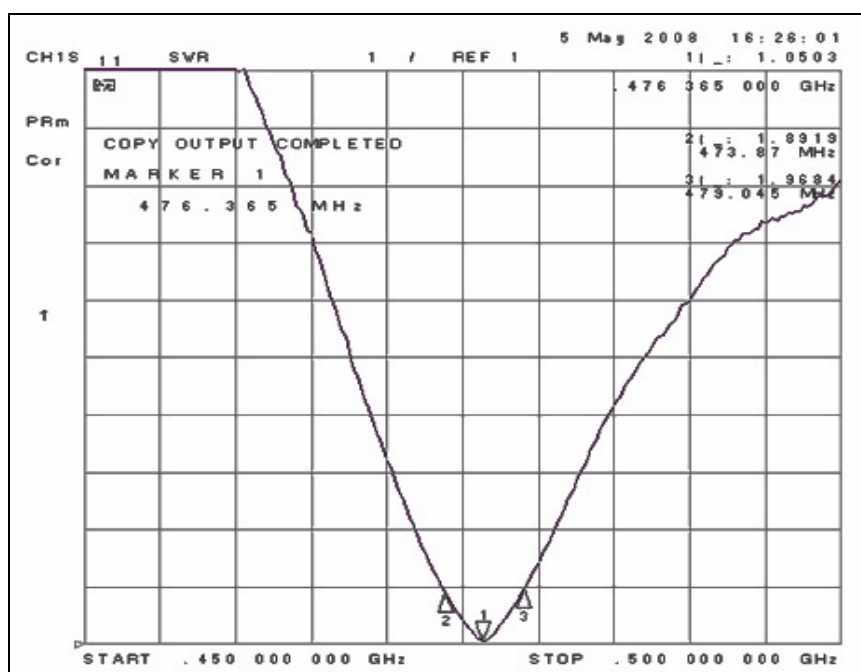
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความถี่



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีแอคแตนซ์กับความถี่



รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ



รูปที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ

จากผลการทดลองวัดสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน โดยใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ ตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ จะสังเกตได้ว่า ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -26.857 dB และมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับ 1:1.0503

4.2.2 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1อิลิเมนต์

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

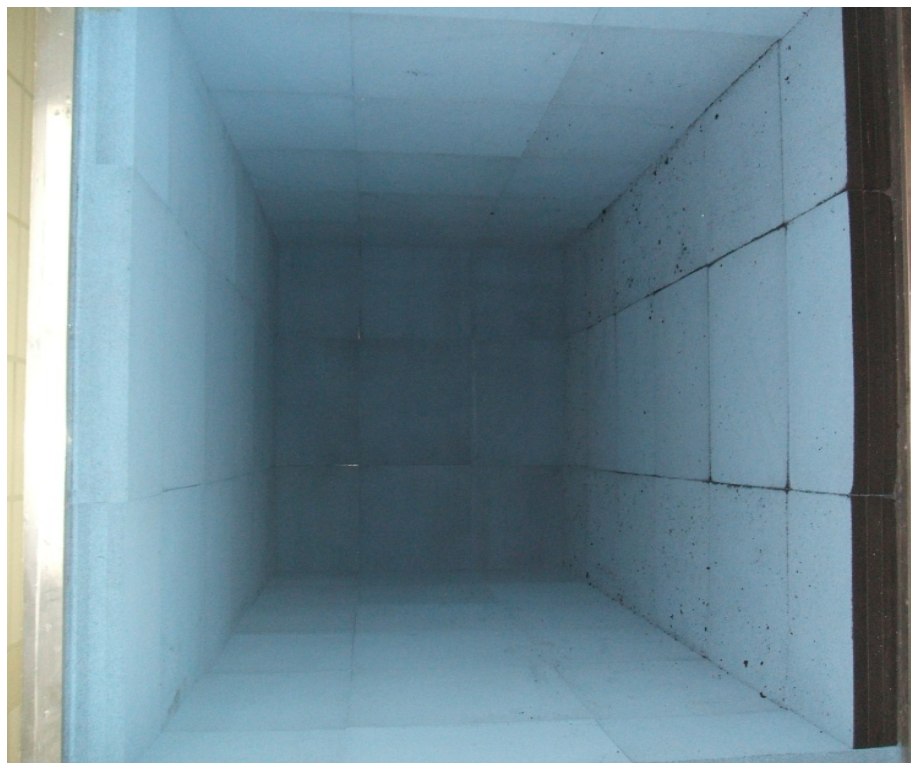
$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

เมื่อ R คือ ระยะของสนามระยะไกล
 D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ
 λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

ในการวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนขนาดของสายอากาศที่ยาวที่สุดมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร ทำให้ได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ เท่ากับ 28.56 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศไดโพลเส้นตรงที่มีความถี่ 476 MHz เป็นสายอากาศอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่น จาก 0 องศา ถึง 360 องศา ในห้อง chamber ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนของคลื่น โดยรูปแบบการวัดการแผ่กำลังงานของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจะได้รูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลวดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ในระนาบสนามไฟฟ้า ในระนาบ xy และระนาบสนามแม่เหล็ก ในระนาบ yz



รูปที่ 4.10 สายอากาศไดโพลอ้างอิงที่ใช้เป็นตัวส่ง



รูปที่ 4.11 ห้อง chamber ใช้สำหรับวัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน



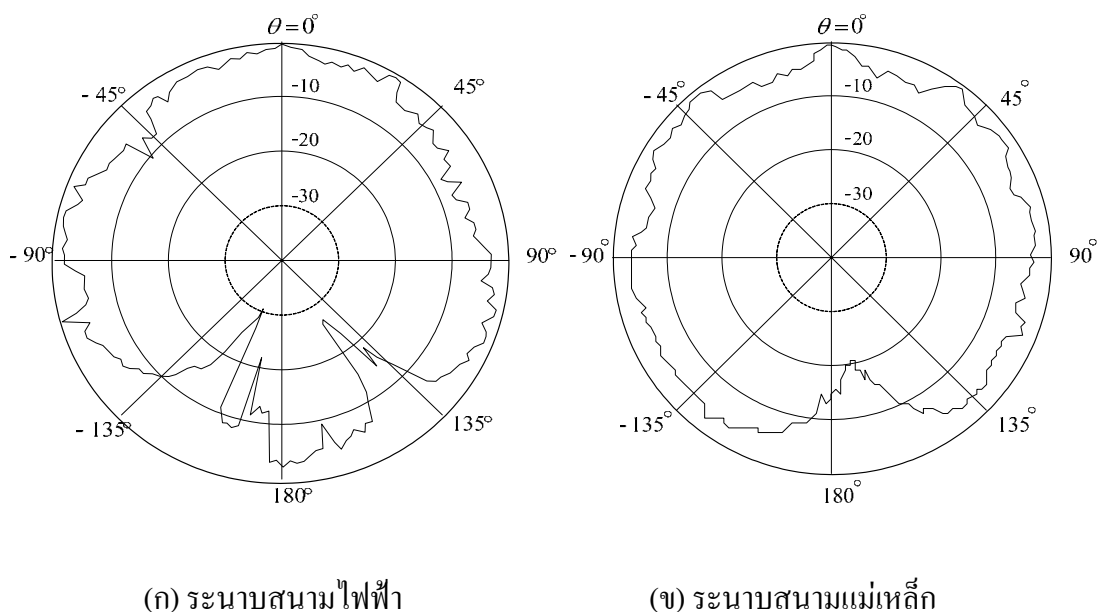
รูปที่ 4.12 วิธีวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศต้นแบบ

ในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กโดยทดสอบในห้องที่ไม่มีการสะท้อน (chamber) สายอากาศที่จะทำการทดสอบนั้นจะเป็นสายอากาศรับ ซึ่งจะทำการหมุนเพื่อรับคลื่นจาก 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา ส่วนสายอากาศส่งเป็นสายอากาศแบบไดโพลเส้นตรง ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศรับ และต้องมีโพลาริซที่เหมือนกัน ระดับความสูงของสายอากาศรับและสายอากาศส่งต้องเท่ากันด้วย รูปที่ 4.13 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D ที่เราใช้ในการวัดค่ารูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน



รูปที่ 4.13 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D

สำหรับการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



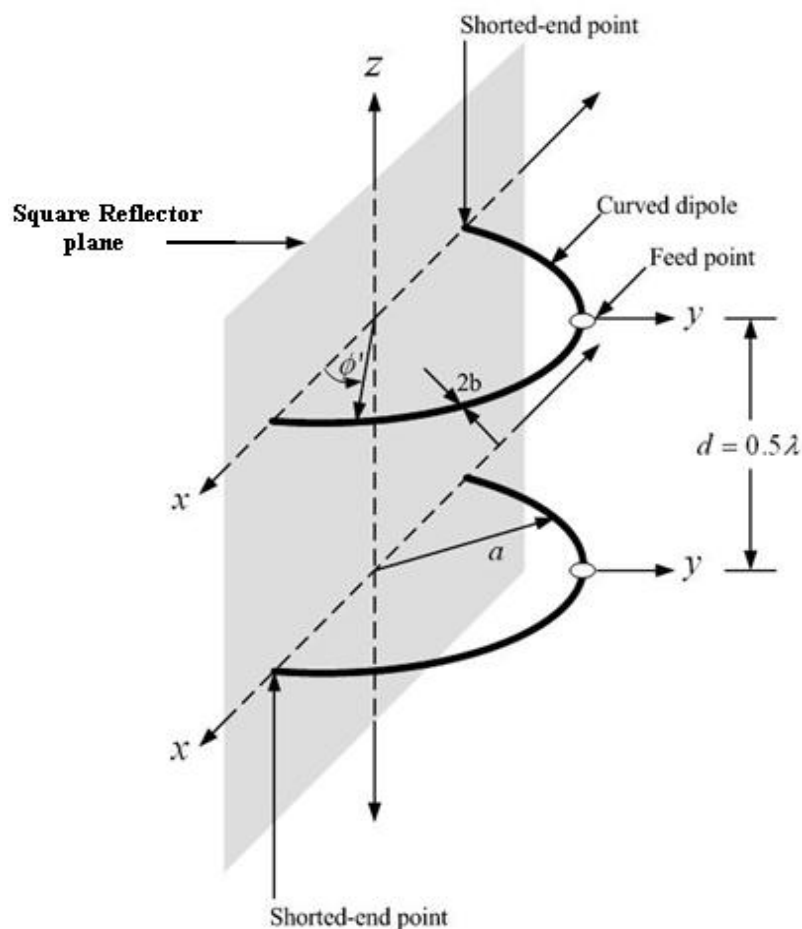
รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์

จากรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เป็นผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ตามลำดับ จากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในแนวระนาบสนามไฟฟ้าจะได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณเท่ากับ 66 องศาและในส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง จะได้ประมาณเท่ากับ 84 องศา

จากผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.14 ได้ค่าที่สอดคล้องกันซึ่งผลการวัดและการออกแบบจะได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้า ประมาณเท่ากับ 66 และ 60 องศา ตามลำดับ ส่วนของในระนาบสนามแม่เหล็กจะได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง จะได้ประมาณเท่ากับ 84 และ 82 องศา ตามลำดับ

4.3 การสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

โครงงานฉบับนี้ได้สร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนแผ่นตัวสะท้อนจำนวน 2 อิลิเมนต์ ที่มีรูปทรงโครงสร้างสายอากาศเหมือนกัน โดยที่มีขนาดรัศมีของสายอากาศไดโพลโค้ง โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง คือ $d = 0.5 \lambda$



รูปที่ 4.15 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

จากโครงสร้างของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนซึ่งสร้างจากสายอากาศแผ่นอลูมิเนียมที่ถูกัดโค้ง และทำการลัดวงจรที่ปลายเข้ากับแผ่นระนาบที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดย d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลโค้ง a คือรัศมีความโค้งของไดโพล ความยาวของสายอากาศได้ถูกวางในแนว ϕ ของพิกัดทรงกระบอก มีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของไดโพล ที่ตำแหน่ง $\phi = \pi/2$ โดยที่ปลายของไดโพลโค้งได้ถูกลัดวงจรลงบนแผ่นตัวสะท้อนดังแสดง ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.16 สายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

ในการวัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อนจะต้องทำการสร้างสายนำสัญญาณมาต่อเพื่อขนานสายอากาศทั้งสองอีลิเมนต์เข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกสายนำสัญญาณลักษณะนี้ว่า เฟสซิ่งไลน์ (phasing line) ซึ่งการต่อใช้งานสายในลักษณะนี้ก็เพื่อจัดเฟสในระบบสายอากาศรวมหลายๆ ตัว หรือ เรียกว่า ควอเตอร์เวฟทรานสฟอร์มเมอร์ (quarter wave transformer) เราจะต้องกำหนดความยาวของสายเฟสซิ่งไลน์เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น แต่เศษต้องเป็นเลขคี่ เช่น $3/4$, $5/4$, $7/4$, $9/4$ เป็นต้น ส่วนจะเป็นเท่าไรขึ้นอยู่กับแบบของสายอากาศ ที่จะนำมาเสต็กกัน วิธีการนี้มีหลักการมาจากสูตร

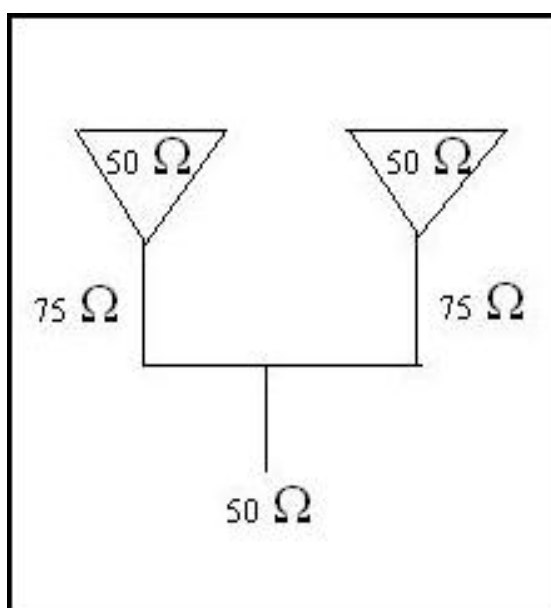
$$Z_0 = \sqrt{Z_s Z_i} \quad (4.2)$$

Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่นำมาใช้

Z_s คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ

Z_i คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

เราจะต้องทำสายอากาศแต่ละตัวให้มีอิมพีแดนซ์ 100 โอห์ม ก่อน เมื่อนำสายอากาศทั้งสองมาต่อขนานกันอิมพีแดนซ์ก็จะลดลงเหลือ 50 โอห์ม พอได้เมื่อลองแทนค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 75 โอห์ม ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ คือ 100 โอห์ม เราจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่ละตัวประมาณ 56 โอห์ม เมื่อต่อสายเฟสซึ่งไลน์เข้าไปจะได้อิมพีแดนซ์รวมที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งจะได้อิมพีแดนซ์ 100 โอห์มทันที เมื่อนำสายอากาศที่ต่อสายเฟสซึ่งไลน์แล้วมาต่อขนานกันก็จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม เพื่อต่อสายนำสัญญาณเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) แต่ก่อนที่จะตัดสายนำสัญญาณจะต้องรู้ค่าความเร็วของสายนำสัญญาณเข้าไปด้วยเนื่องจากค่าความเร็วคลื่นในสายนำสัญญาณ (Velocity Factor) นั้นเดินทางได้ช้ากว่าในบรรยากาศและช้ากว่าความเร็วของแสงซึ่งค่าความเร็วของคลื่นในสายนำสัญญาณนี้สัมพันธ์กับค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาทำเป็น Dielectric (Dielectric constant) โดยทั่วไปแล้วค่าความเร็วของคลื่นในสายเรียกว่า ตัวคูณความเร็วของสายโดยดูจากตาราง 4.1 ค่าที่ได้ออกมาจึงเป็นค่าความยาวจริงที่ใช้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ 4.17 ค่าความต้านทานในสาย phasing line

ตาราง 4.1 แสดงคุณสมบัติของสายนำสัญญาณประเภทต่าง ๆ

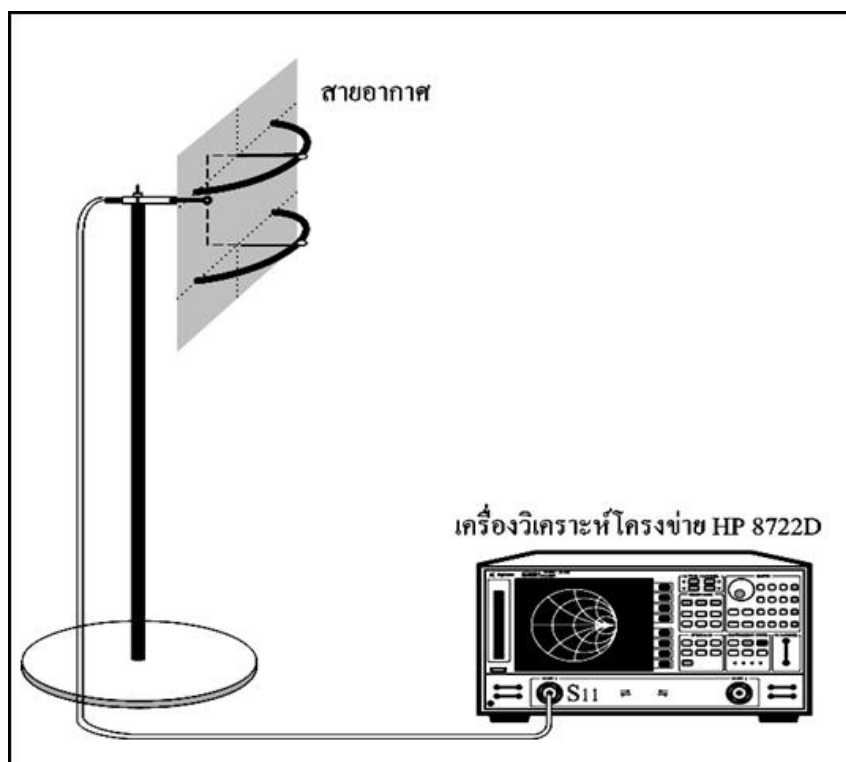
| สาย | ค่า Impedance (Ω) | ค่าตัวคูณ ความเร็ว (Vr) | ค่าประจุ ไฟฟ้า (pf/ฟุต) | เส้นผ่าศูนย์กลาง (นิ้ว) | วัสดุที่ใช้ทำ ไดอิเล็กทริก | แรงดันใช้ งาน สูงสุด (Vrms) |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| RG-6 | 75 | 0.75 | 18.6 | 0.266 | Foam PE | 400 |
| RG-8X | 52.0 | 0.75 | 26.0 | 0.242 | Foam PE | 300 |
| RG-8 | 52.0 | 0.66 | 29.5 | 0.405 | PE | 4000 |
| RG-8 foam | 50.0 | 80 | 25.4 | 0.405 | Foam PE | 1500 |
| RG-8A | 52.0 | 0.66 | 29.5 | 0.405 | PE | 5000 |
| RG-9 | 51.0 | 0.66 | 30.0 | 0.420 | PE | 4000 |
| RG-9A | 51.0 | 0.66 | 30.0 | 0.420 | PE | 4000 |
| RG-9B | 50.0 | 0.66 | 30.8 | 0.420 | PE | 5000 |
| RG-11 | 75.0 | 0.66 | 20.6 | 0.405 | PE | 4000 |
| RG-11 foam | 75.0 | 0.80 | 16.9 | 0.405 | Foam PE | 1600 |
| RG-11A | 75.0 | 0.66 | 20.6 | 0.405 | PE | 5000 |
| RG-58 | 53.5 | 0.66 | 28.5 | 0.195 | PE | 1900 |
| RG-58 foam | 53.5 | 0.79 | 28.5 | 1.195 | Foam PE | 600 |
| RG-58A | 53.5 | 0.66 | 28.5 | 0.195 | PE | 1900 |
| RG-58B | 53.5 | 0.66 | 28.5 | 0.195 | PE | 1900 |
| RG-58C | 50.0 | 0.66 | 30.8 | 0.195 | PE | 1900 |
| RG-59 | 73.0 | 0.66 | 21.0 | 0.242 | PE | 2300 |
| RG-59 foam | 75.0 | 0.79 | 16.9 | 0.242 | Foam PE | 800 |
| RG-59A | 73.0 | 0.66 | 21.0 | 0.242 | PE | 2300 |



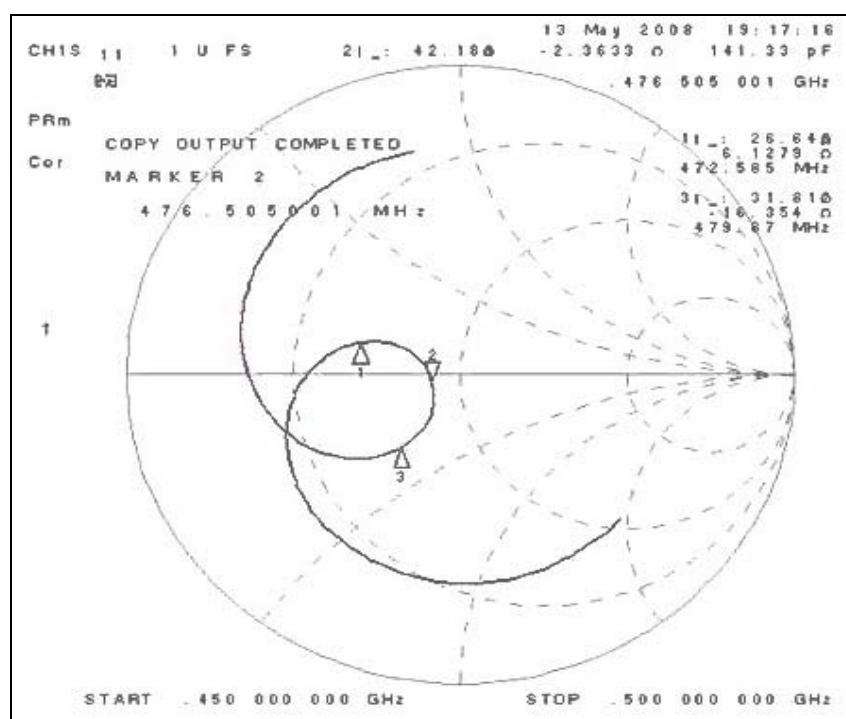
รูปที่ 4.18 สาย Phasing line ของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

4.3.1 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)

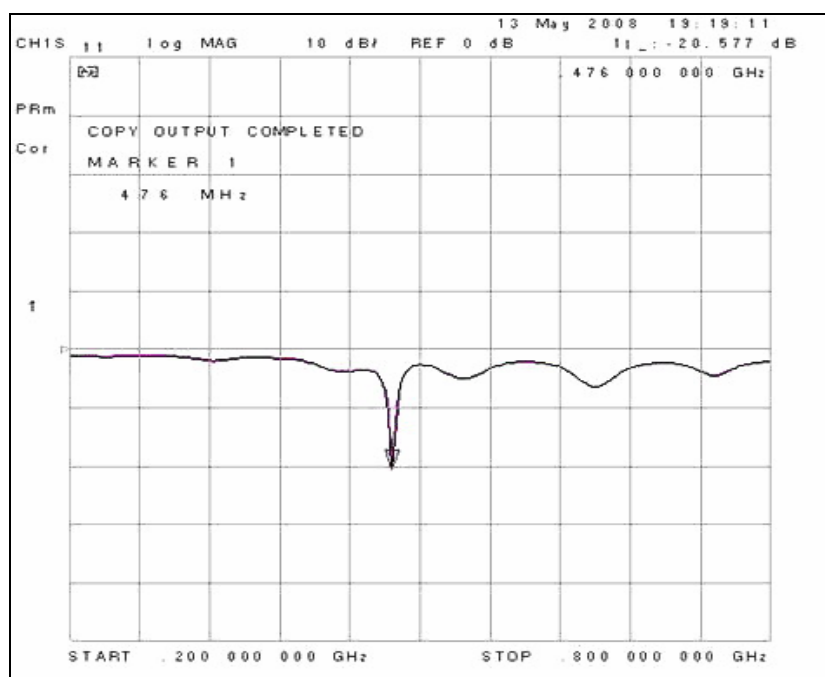
ในการวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายที่แผ่นตัวสะท้อนใช้หลักการวัดแบบเดียวกันกับสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์ แต่จะต้องทำตัวรวมสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งด้วย ซึ่งในโครงการฉบับนี้ได้ทำการออกแบบความต้านทานในสายของตัวรวมสัญญาณดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 เป็นรูปที่ใช้งานจริงในการวัด ซึ่งในการวัดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะต้องมีค่าเท่ากับ หรือใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุดโดยสามารถดูจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่จะต้องไม่เกิน 1.5 dB ซึ่งการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



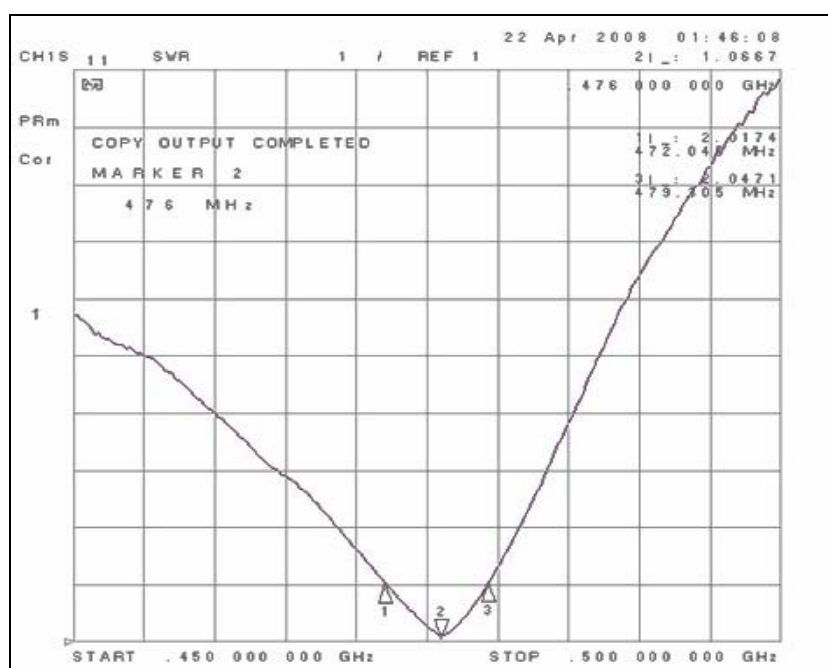
รูปที่ 4.19 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ



รูปที่ 4.20 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศจากการวัด



รูปที่ 4.21 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ
 ไดโพลโค้งตั้งวางจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน



รูปที่ 4.22 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ

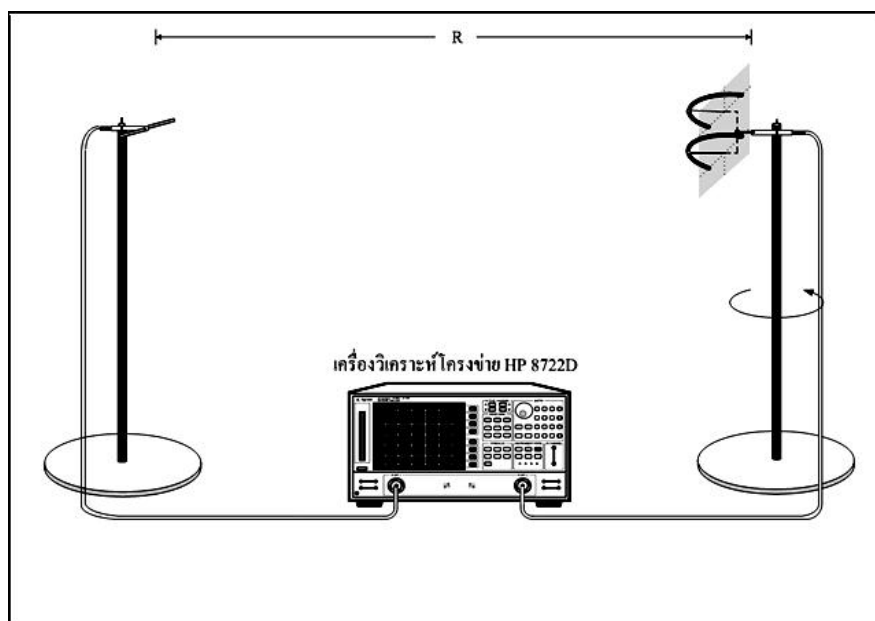
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับสามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity : dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมตช์อย่างสมบูรณ์และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบูรณ์ที่สุด ดังนั้น ในงานประยุกต์ต่าง ๆ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือ ต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่รูปที่ 4.21 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าน้อยกว่า-10 dB ตลอดช่วงความถี่ 472.048 MHz ถึง 479.305 MHz

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตช์ของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึง อนันต์ ถ้าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตช์ที่สมบูรณ์ ส่วนค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ หมายความว่า กำลังไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับอนันต์หมายความว่า สายอากาศนั้นเกิดการไม่แมตช์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับออกมาทั้งหมดทำให้เครื่องส่งเสียหายได้ ซึ่งจากรูป 4.22 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 476 MHz เท่ากับ 1:1.0667

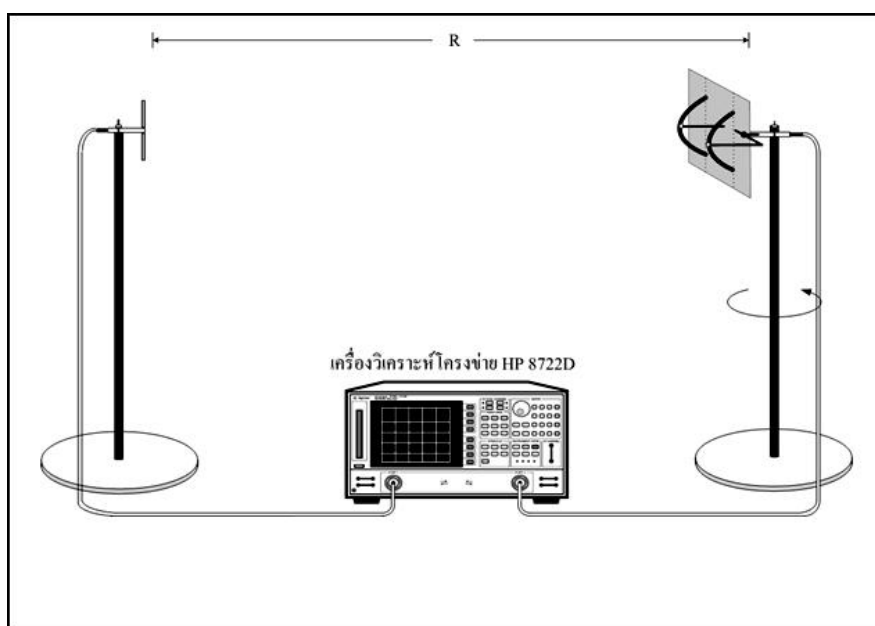
จากผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้ง ลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ที่ความถี่ 476 MHz จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ $42.18 - j2.363 \Omega$ มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -20.577 dB และมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับ 1:1.0667

4.3.2 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อิลิเมนต์

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ $R \geq 2D^2/\lambda$ เมื่อ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบ และสายอากาศอ้างอิง ในการทดสอบนี้เรากำหนดให้ระยะทางมีค่าคงที่ โดยมีความถี่ในการออกแบบ เท่ากับ 476 MHz ได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ เท่ากับ 91.51 เซนติเมตร และ D คือ ขนาดของสายอากาศที่ยาวที่สุดมีค่าเท่ากับ 53.7 เซนติเมตรซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศไดโพลเส้นตรงที่ความถี่ 476 MHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่น จาก 0 องศา ถึง 360 องศา ซึ่งจะ ทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



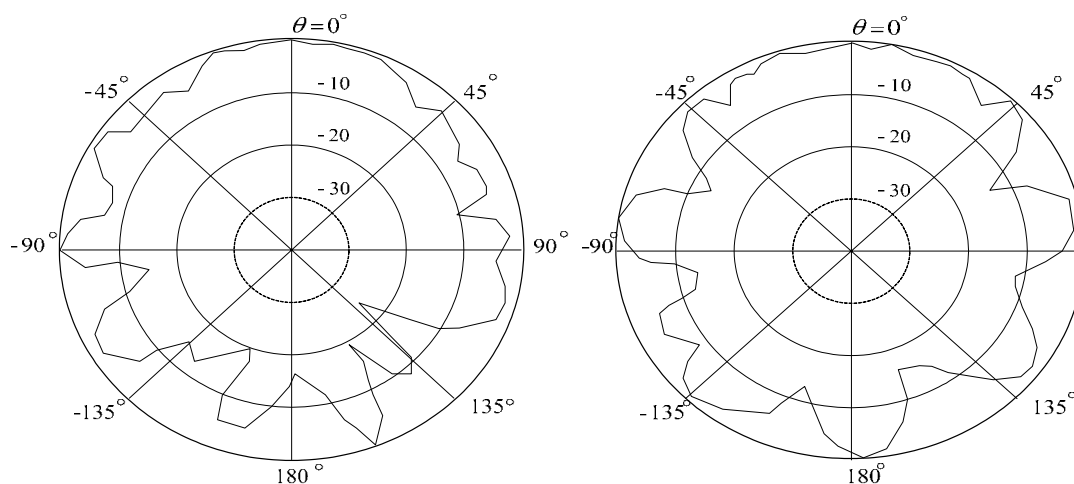
(ก) วิธีการวัดทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) วิธีการวัดทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.23 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบน
แผ่นตัวสะท้อน

จากผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้ง ลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ที่ความถี่ 476 MHz นำค่าที่ได้จากการทดลองไปพล็อต กราฟใน ระบายสนามไฟฟ้า และระบายสนามแม่เหล็กจะได้ ดังรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อิลิเมนต์

จากรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) เป็นผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศใน แนวระบายสนามไฟฟ้าและในระบายสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อิลิเมนต์ ตามลำดับจากผลการวัดจะได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระบายสนามไฟฟ้าและในระบาย สนามแม่เหล็ก ประมาณเท่ากับ 64 และ 80 องศา ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบในระบาย สนามไฟฟ้าและในระบายสนามแม่เหล็กจะมีค่า 60 และ 82 องศา จะเห็นได้ว่าเมื่อเราเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์เข้าไปค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระบายสนามไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกันส่วนใน ระบายสนามแม่เหล็กค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าแคบกว่า

ตาราง 4.2 ผลการวัดของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน

| คุณลักษณะของ สายอากาศ | สายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ | สายอากาศแฉวลำดับไดโพลโค้ง 2 อิลิเมนต์ |
|---------------------------------|----------------------------------|--|
| Input Impedance (Ω) | 51.39 -j7.65 | 42.18-j2.363 |
| S_{11} (dB) | -26.857 | -20.577 |
| SWR | 1.0503 | 1.0667 |
| HPBW E-plane (องศา) | 66 | 64 |
| HPBW H-plane (องศา) | 84 | 80 |

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 เป็นการทดสอบวัดสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน ตามที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ 4NEC2 มาแล้วในบทที่ 3 เพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบคือ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่งและแบบรูปการแผ่กำลังงาน ซึ่งผลการวัดกับ ทฤษฎีสอดคล้องกันทั้งสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 1 อิลิเมนต์และสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรปลายบนแผ่นตัวสะท้อน 2 อิลิเมนต์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

โครงการฉบับนี้ได้ดำเนินการศึกษาวิเคราะห์ห้ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบแล้วทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนแผ่นตัวสะท้อน ซึ่งมีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของไดโพลโค้ง คุณสมบัติของสายอากาศจะต้องมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักเบา รองรับกำลังงานที่สูงได้ มีความกว้างลำคลื่น สำหรับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าสูง จึงจำเป็นต้องทำการพัฒนาอุปกรณ์สายอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการและสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ในโครงการฉบับนี้ได้ใช้เทคนิคการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งและลัดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับแผ่นตัวสะท้อน และเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของลำคลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น ในโครงการฉบับนี้ได้นำโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (4NEC2) เข้ามาวิเคราะห์ โดยโครงสร้างของสายอากาศได้ถูกแทนด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า ในการหากระแสเหนี่ยวนำบนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด หรือ สนามที่ตกกระทบ ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป 4NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ อัตราขยาย และสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้กำลังงาน และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศได้

การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในโครงการฉบับนี้จะเริ่มจากอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ความกว้างแถบ และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบไดโพลโค้ง อัตราส่วนแกน และอัตราขยาย ซึ่งทำให้มีความรู้และเข้าใจในพื้นฐานของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ในส่วนของการออกแบบเพื่อจะนำสายอากาศไปใช้งาน สิ่งสำคัญนั้นจะต้องทำให้สายอากาศมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนั้นๆ และเงื่อนไขที่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบสายอากาศนั้นก็คือแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ และอัตราส่วนเกรน การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีทั้งหมดทำโดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2

จากบทที่ 4 ได้แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ และอัตราขยายของสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้าง จะพบว่าผลการทดสอบนั้น เป็นที่ยอมรับได้ คือค่อนข้างตรงตามทฤษฎี และตามความต้องการของสายอากาศที่จะใช้งานจริง ไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ความกว้างแถบ และอัตราขยายของสายอากาศ เพื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ที่นำเสนอไว้ข้างต้น และสุดท้ายได้สร้างสายอากาศต้นแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อยืนยันความถูกต้องด้วยผลการทดลองวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 4

ตาราง 5.1 ตารางสรุป

| คุณลักษณะของ สายอากาศ | ไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ (ออกแบบ) | ไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ (ผลวัด) | ไดโพลโค้ง 2 อิลิเมนต์ (ผลวัด) |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Input Impedance (Ω) | 47.2+j22.9 | 51.39 -j7.65 | 42.18-j2.363 |
| S_{11} (dB) | -24.458 | -26.857 | -20.577 |
| SWR | 1.0431 | 1.0503 | 1.0667 |
| HPBW E-plane (องศา) | 60 | 66 | 64 |
| HPBW H-plane (องศา) | 82 | 84 | 80 |

สรุปผลที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศมีความสอดคล้องกับผลผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม 4NEC2 แต่ผลจากการวัดทดสอบอาจจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปบ้างเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรม 4NEC2 คืออาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ สุดท้ายเกิดจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศเพราะการทดสอบสายอากาศที่ได้นั้น ควรจะหาพื้นที่โล่งและกว้างพอสมควร เพื่อลดปัญหาการบังหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศภาคส่ง และภาครับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากบทสรุปที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า นอกจากการเลือกเทคนิคของการสร้างสายอากาศที่เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการทำงานสำหรับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าสูง ยังต้องพิจารณาถึงกระบวนการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศด้วย เพื่อที่จะนำผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณและวิเคราะห์ไปประกอบการสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป และสายอากาศที่จะนำมาเป็นสายอากาศภาคส่งต้องมีความถี่เรโซแนนซ์ เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ของสายอากาศที่จะทำการทดสอบ เพื่อให้สายอากาศทั้งสองตัวทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่เดียวกัน ในส่วนของการวัดเพื่อบันทึกค่านั้น ควรทำการวัดอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย จะทำให้ได้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง

การนำสายอากาศไดโพลโค้งไปใช้งานในระบบแพร่สัญญาณภาพและเสียงสำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ระบบ UHF สายอากาศแบบไดโพลโค้งควรจะถูกพัฒนาต่อไปในด้านของขนาด วิธีการแมตช์ให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้นเพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออกทุกทิศทางอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่เหมาะสม และมีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์, Antenna Engineering, from <http://sut.ac.th/e-text/antennas>, 2004
- [2] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC. 1982
- [3] R. Dean Straw, The ARRL Antenna Book 17th Edition, The American Radio Relay League, 1994
- [4] International, Transmission antenna characteristics at VHF and UHF, Recommendation ITU-R BS.1195, Telecommunication Union, 1995
- [5] NEC-2 User's Guide, from <http://www.traveller.com/~richesop/nec>
- [6] Antenna Design for Omnidirectional Coverage. Antennas and Propagation Society International Symposium.
- [7] Casciola, D., Miers, G.L., and Surette, R.A. (1999). UHF Antenna Choices. IEEE Transaction Broadcasting.
- [8] Cheng, D.K. (1991). Gain Optimization for Yagi-Uda Arrays. IEEE Antennas and Propagation Magazine.
- [9] Pimpol, S., and Wongsan, R. (2007). Impedance Analysis of a Shorted-End Curved Dipole on Reflector Plane using Method of Moments. **ECTI International Conference**.
- [10] <http://www.wijitboonchoo.com/audioclinic/show.php?id=6879>
- [11] http://203.172.182.172/elearning/loeidata/97/unit_3_Standad_txtv.doc
- [12] <http://www.geocities.com/kraiyoung/Formula.htm>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวคณินิจ ดาทองงอน
 วัน-เดือน-ปีเกิด 7 กรกฎาคม 2525
 ที่อยู่ 10/1 หมู่ 4 ต.โนนดินแดง อ.โนนดินแดง จังหวัดบุรีรัมย์ 31260
 การศึกษา -ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลโนนดินแดง จังหวัดบุรีรัมย์
 -ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนร่มเกล้าบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์
 การศึกษาปัจจุบัน นักศึกษาชั้นปีที่ 6 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 โทรศัพท์ 085-4195308

ชื่อ-นามสกุล นายอรรถการ สุขบันเทิง
 วัน-เดือน-ปีเกิด 8 กันยายน 2525
 ที่อยู่ 182 หมู่ 1 ต.หินเหล็กไฟ อ.คูเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31190
 การศึกษา -ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์
 -ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนารีนุกูล จังหวัดอุบลราชธานี
 การศึกษาปัจจุบัน นักศึกษาชั้นปีที่ 6 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 โทรศัพท์ 089-5820386

ชื่อ-นามสกุล นายเฉลิมเกียรติ สกุลพอง
 วัน-เดือน-ปีเกิด 30 ตุลาคม 2526
 ที่อยู่ 112 หมู่ 1 ถ.สมเด็จพระปทุม อ.เมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000
 การศึกษา -ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอุบลวิทยาคม จังหวัดอุบลราชธานี
 -ระดับมัธยมศึกษา วิทยาลัยเทคนิค จังหวัดอุบลราชธานี
 การศึกษาปัจจุบัน นักศึกษาชั้นปีที่ 6 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 โทรศัพท์ 084-4315667, 086-7240286